

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2014

Bc. Pavel Tichý

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Vytvoření SW pro monitorování chodu laboratorní elektrické  
odporové pece**

Creating of Monitoring Software for Operation of Laboratory Electric  
Resistance Furnace

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Tichý**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: Vytvoření SW pro monitorování chodu laboratorní elektrické odporové  
pece  
Creating of Monitoring Software for Operation of Laboratory Electric  
Resistance Furnace

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky nepřímého odporového ohřevu
2. Měření teplot, měření odběru
3. Návrh měřicího zapojení, volba programovacího jazyka a vývojového prostředí
4. Koncepce a popis programu
5. Možnosti využití vytvořeného programu, zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Hradílek, Z., Lázníčková, I., Král, V. Elektrotepelná technika. Praha: ČVUT Praha, 2011. ISBN 978-80-01-043938-9
- [2] Hradílek, Z. a kol. Elektrotepelná technika. Simulace - počítačové programy. Skriptum. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2001
- [3] Kreidl, M.: Měření teploty - senzory a měřicí obvody. Praha: BEN Praha, 2005
- [4] Microsoft Visual Basic 6. Příručka programátora. Brno: Computer Press, 1999, ISBN 80-7226-154-1
- [5] Halvorson, M. Microsoft Visual Basic Professional 6. Krok za krokem. Brno: Computer Press, 1999, ISBN 80-7226-166-X

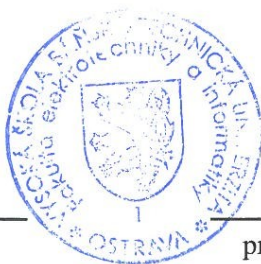
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Vladimír Král, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

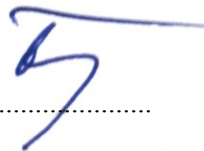


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

*„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Ostravě dne 2.5.2014

Podpis .....



*Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vladimíru Královi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.*

**Abstrakt:**

Hlavní náplní této práce bylo vytvořit program "PEC", který zajišťuje monitoring a měření chodu pece MP05-01 a tím poukázat na využití kombinace stolního počítače, měřicí karty PCA-7228AS a vývojového prostředí Visual Basic jako plnohodnotného měřicího přístroje. Dále se v této práci řeší problematika měření el. energie při pulzní regulaci. Jsou zde popsány metody výpočtu el. energie a v závěru této práce je popsáno měření, které porovnává několik měřičů el. energie a jejich chování při pulzní regulaci.

**Klíčová slova:**

elektrická energie, měřicí karta PCA-7228AS, pulzní regulace, Visual Basic

**Abstract:**

The main concern of this work was to develop a software "PEC", which provides monitoring and measuring operation of the furnace MP05-01 and pointed out that the use of a combination of a desktop computer, measuring card PCA-7228AS and development environment Visual Basic as a full meter. Furthermore, this work addresses the issue of measuring el. energy in the pulse control. There are described methods of calculating el. energy and at the conclusion of this work is described measurement which compares a few meters el. energy and their behavior during the pulse control.

**Key words:**

electrical energy, measuring card PCA-7228AS, pulse control, Visual Basic

## Seznam použitých symbolů a zkratk

Zkratka	Význam	Jednotka
ActiveX	technologie pro sdílení informací mezi různými aplikacemi	-
Ag	chemická značka stříbra	-
Al	chemická značka hliníku	-
Au	chemická značka zlata	-
B	magnetická indukce	T
Bi	chemická značka bismutu	-
COM	Component Object Model	-
Cr	chemická značka chromu	-
Cu	chemická značka mědi	-
DAO	Data Access Object	-
E	elektrická energie	Wh
Fe	chemická značka železa	-
<i>grad</i> T	teplotní gradient (spád)	-
GUI	Graphical User Interface	-
Hg	chemická značka rtuti	-
I	elektrický proud	A
IDE	Integrated Development Environment	-
IEC	International Electrotechnical Commission	-
Mg	chemická značka hořčíku	-
Ni	chemická značka niklu	-
P	výkon	W
p	okamžitý výkon	W
Pb	chemická značka olova	-
Pt	chemická značka platiny	-
Q	teplo	J
R	elektrický odpor	$\Omega$
RAD	Rapid Application Development	-
Rh	chemická značka rhodia	-
Sb	chemická značka antimonu	-
Si	chemická značka křemíku	-
Sn	chemická značka cínu	-
T	termodynamická teplota	K
TTL	Transistor Transistor Logic	-
U	elektrické napětí	V
W	chemická značka wolframu	-
W	tepelná energie	J
Zn	chemická značka zinku	-
$\alpha$	součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\varepsilon$	emisivita	-
$\Phi$	tepelný tok	W

## Obsah

1.	Úvod .....	1
2.	Rozbor problematiky nepřímého odporového ohřevu .....	2
2.1.	Elementární forma Ohmova a Joulova zákona .....	2
2.2.	Proudění tepla, přenos energie difúzně-konvekční .....	3
2.3.	Přenos tepla sáláním .....	5
2.4.	Nepřímý odporový ohřev .....	6
2.5.	Matematický model ohřevu tepelně masivní vsázky při $\vartheta_p = \text{konst.}$ .....	7
2.6.	Matematický model ohřevu tepelně drobné vsázky při $\vartheta_p = \text{konst.}$ .....	10
2.7.	Energetická bilance elektrotepelné konverze .....	11
2.8.	Konstrukce elektrické odporové pece s nepřímým ohřevem .....	12
2.9.	Materiály pro topné články kovové .....	13
2.10.	Materiály pro topné články nekovové .....	14
2.11.	Vliv provozu odporových pecí na napájecí síť .....	15
3.	Měření teplot a měření odběru proudu .....	17
3.1.	Senzory teplot .....	17
3.2.	Termoelektrický jev .....	17
3.3.	Typy termoelektrických článků .....	19
3.3.1.	Popis jednotlivých částí termočlánku .....	20
3.4.	Měření proudu .....	23
4.	Návrh měřicího zapojení .....	26
4.1.	Laboratorní pec .....	27
4.1.1.	Obsluha regulátoru .....	29
4.2.	Měřicí karta .....	30
4.2.1.	Funkce měřicí karty PCA-7228AS použité v programu "PEC" .....	31
4.3.	Měření teploty .....	34
4.4.	Volba programovacího jazyka .....	35
4.4.1.	Vývojové prostředí .....	35
5.	Koncepce a popis programu .....	37
5.1.	Efektivní hodnota .....	41
5.2.	Pulzní regulace .....	42
6.	Měření el. energie u zařízení s pulzní regulací .....	43
6.1.	Měření č. 1 .....	43

6.2.	Měření č. 2.....	49
7.	Možnosti využití vytvořeného programu .....	51
7.1.	Praktická ukázka využití vytvořeného programu .....	51
8.	Závěr.....	54
	Použitá literatura.....	55
	Příloha A .....	56



## 1. Úvod

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit nový program pro monitoring chodu laboratorní odporové pece typ MP05-01. Tento program nahradí stávající program "PEC", který se používá na VŠB-TUO na katedře elektroenergetiky v laboratoři č. 104. Program "PEC" se používá při výuce předmětů zabývajících se elektrotepelnou technikou a využitím počítačů pro měření a regulaci. Stávající program "PEC" měl určité nedostatky, které způsobovaly chyby při měření el. veličin při chodu laboratorní pece. Hlavním problémem tohoto programu bylo zpracování vzorků pouze z jednoho měřicího kanálu. Tento kanál měřil odebíraný proud pece. Pro výpočty spotřebované energie se proto musela dosazovat za napětí konstanta 230V. Jelikož při provozu pece dochází k poklesům napětí při spínání topných článků, způsobuje tato konstanta chybu při výpočtech spotřebované el. energie. Další chybou tohoto programu je výpočet spotřebované energie z efektivní hodnoty proudu. Tento problém je blíže popsán v kapitole 6.

Nový program "PEC" již zpracovává vzorky ze dvou měřicích kanálů, což zajišťuje potřebnou přesnost při výpočtech a navíc je použito jiného algoritmu pro výpočet el. energie. Dále je v této práci rozebrán problém měření el. energie u zařízení s pulzní regulací výkonu.



*Obr. 1.1 Pracoviště pro měření chodu laboratorní odporové pece MP05-01.*

## 2. Rozbor problematiky nepřímého odporového ohřevu

### 2.1. Elementární forma Ohmova a Joulova zákona[2]

Podle elektronové teorie je v krystalové mřížce kovových materiálů nezaplněné valenční pásmo anebo se překrývá s vodivostním pásmem. V obou případech to znamená volný pohyb elektronů. Pokud takový materiál vystavíme působení elektromagnetického pole, valenční elektrony s nábojem  $e$  se kromě tepelného pohybu začnou posouvat s určitým zrychlením  $a$ , proti směru vektoru intenzity elektrického pole  $\vec{E}$ . Tento pohyb elektronů je důsledkem působení síly  $\vec{F}$ , která působí na náboje elektronů. Pro jeden elektron s rychlostí  $\vec{v}$  a efektivní hmotností  $m_{ef}$  platí velikost síly podle rovnice:

$$\vec{F} = -|e| \cdot \vec{E} = m_{ef} \cdot \frac{dv}{dt} = m_{ef} \cdot a \quad (2.1)$$

Statisticky pro celé valenční nebo vodivostní pásmo je možné uspořádaný pohyb elektronů vyjádřit jejich tokem, tj. hustotou elektrického proudu:

$$\vec{J} = e \cdot n_e \cdot \vec{v} \text{ [A} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}, \quad (2.2)$$

kde  $n_e$  je koncentrace elektronů v jednotce objemu [ $\text{m}^{-3}$ ]. Mezi rychlostí elektronů a vektorem elektrického pole  $\vec{E}$  existuje lineární závislost  $\vec{v} = u \cdot \vec{E}$ , ve které konstanta  $u$  vyjadřuje pohyblivost elektronů. Platí zároveň i rovnice

$$\vec{J} = e \cdot n_e \cdot u \cdot \vec{E} = \gamma \cdot \vec{E} \quad (2.3)$$

resp.

$$\vec{E} = \frac{1}{\gamma} \cdot \vec{J} = \rho \cdot \vec{J}, \quad (2.4)$$

přičemž  $\gamma = e \cdot n_e \cdot u$  má fyzikální význam konduktivity vodivého prostředí a  $\rho$  jeho rezistivity (měrného odporu). Rovnice (2.3) a (2.4) jsou matematickým vyjádřením Ohmova zákona v elementární formě.

V krystalové mřížce kovů jsou kladné ionty umístěné v uzlech a zároveň vykonávají harmonické kmity přímo úměrné svým rovnovážným stavům. V elektronové teorii jsou tepelné vibrace mřížky v souladu s modelem Einsteina a vyjadřují se sumou pružných vln s různými frekvencemi  $f$ . Každé vlně přísluší kvanta energie tepelných vibrací s hodnotou:

$$W_f = h \cdot f \quad (2.5)$$

kde  $h$  je Plancková konstanta  $6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

Tepelné vibrace iontů jsou překážkou usměrněnému pohybu elektronů, což znamená, že kladou elektrický odpor vodivostnímu proudu, což vyjadřuje i Ohmův zákon (2.4). Z pohledu energetické bilance v krystalové mřížce kovu to znamená, že elektrony odevzdávají formou nepružných srážek část svojí kinetické energie  $\Delta W_k$  získanou v elektromagnetickém poli kladným iontům. Tím se zvýší rozkmit iontů (tzn. posunutí  $\Delta x$  od rovnovážné polohy) a vzroste jejich potenciální energie o hodnotu  $\Delta W_p$ . Pokud hmotnost iontu označíme  $m_i$  a  $\omega_i = 2 \cdot \pi \cdot f$  bude charakteristická úhlová frekvence vibrací iontů, potom rovnice energetické bilance přeměny kinetické energie elektronů na potenciální energií iontů bude  $\Delta W_k = \Delta W_p$ , tj.

$$\frac{1}{2} \cdot m_{ef} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot \omega^2 \cdot (\Delta x)^2 \quad (2.6)$$

Zvýšení amplitudy tepelných vibrací iontů  $\Delta x$  je přímou příčinou zvýšení jejich teploty, tedy ohřevu kovového materiálu vodivostním proudem. Ještě vyjádříme závislost mezi vodivostním proudem a prací elektromagnetického pole (vnější práci elektrických sil). Za tímto účelem vynásobíme rovnici (2.2) vektorem intenzity elektrického pole  $\vec{E}$ . S využitím (2.1) dostaneme

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = e \cdot n_e \cdot v \cdot \frac{\vec{F}}{e} = n_e \cdot v \cdot \vec{F} \quad (2.7)$$

nebo za pomoci Ohmova zákona:

$$\gamma \cdot E^2 = \rho \cdot J^2 = n_e \cdot v \cdot F \equiv v_w \equiv q_e [W \cdot m^{-3}] \quad (2.8)$$

Tento výsledek můžeme interpretovat takto: Když v kovovém materiálu vodivostní proud není vázaný s elektrickými procesy a ani s jinými změnami struktury materiálu, potom vnější práce elektrických sil pole se spotřebuje na zvýšení tepelného obsahu objemové jednotky materiálu za jednotku času. Je to zrovna rychlost změny energie v jednotce objemu  $v_w$  resp. hodnota měrného výkonu vnitřního zdroje  $q_e$ . Rovnicí (2.8) je tedy definován, elektrickými parametry materiálu ( $\gamma$ ,  $\rho$ ) a parametry zdroje energie ( $\vec{E}$  resp.  $\vec{J}$ ), měrný výkon  $q_e$  konvertovaný na teplo. Rovnice (2.8) vyjadřuje tepelný děj v diferenciální formě, způsobený vodivostním proudem s hustotou  $J$ , v souladu s rovnicí (2.2). Je to známý Joulov zákon v elementární formě.

## 2.2. Proudění tepla, přenos energie difúzně-konvekční[1]

Konvekce je takový způsob přenosu tepla, který je vázán na přenos hmoty o určité vnitřní energii z jednoho místa na druhé. Z makroskopického pohledu se nejedná o přenos tepla, ale o přenos hmoty, na kterou je teplo vázané. Tento pohyb je iniciován buď gradientem teploty, nebo také vnějším působením (např. ventilátorem). Rozlišují se tedy dvě možnosti:

- 1) přirozená konvekce,
- 2) nucená konvekce.

V obou případech se přenos hmotnosti prostředí vyjadřuje pomocí vektoru hustoty toku hmotnosti ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )

$$m_k = \rho \cdot v \quad (2.9)$$

Vektor hustoty tepelného toku proudění získáme vynásobením hustoty toku hmotnosti  $m_k$  přenášenou vnitřní energií ( $m \cdot c \cdot \vartheta$ ) v jednotce hmotnosti, tedy

$$q_k = m_k \cdot c \cdot T = v \cdot \rho \cdot c \cdot T = v \cdot u, \quad (2.10)$$

což je v souladu s 1. větou termodynamiky a vyjadřuje přenos tepla pouze prouděním. V reálném prostředí se na přenosu tepla v prostředí podílí i difúze (difúzní přenos tepla). Celkový přenos tepla je poté difúzně-konvekční

$$q_{v,k} = q_v + q_k = -\lambda \cdot grad T + v \cdot \rho \cdot v \cdot c \cdot T \quad (2.11)$$

Příspěvek jednotlivých tepelných toků v rovnici (2.11), je závislý na druhu, rychlosti, termodynamických a hydrodynamických podmínkách prostředí. Toto posouzení je v praxi velmi složité a náročné, proto se pro běžné potřeby používá matematicko-experimentální model. Pro obtékání povrchu pevného prostředí s teplotou  $T_p$  a proudící tekutinou s teplotou  $T_i$  platí rovnice

$$q_k = \alpha \cdot (T_p - T_i) = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.12)$$

To znamená, že hustota tepelného toku prouděním je přímo dána teplotním rozdílem mezi povrchem a tekutinou. Velikost hustoty ovlivňuje součinitel přestupu tepla  $\alpha$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

Součinitel přestupu tepla prouděním  $\alpha$  je závislý na tlaku, teplotě a rychlosti proudění tekutiny, na druhu proudění (laminární nebo turbulentní) a na fyzikálních vlastnostech kapaliny (hustotě, měrné tepelné kapacitě, tepelné vodivosti a viskozitě) a dále na tvaru, rozměrech a drsnosti obtékaného tělesa. Následující tabulka uvádí hodnoty tohoto součinitele pro některé známé případy.

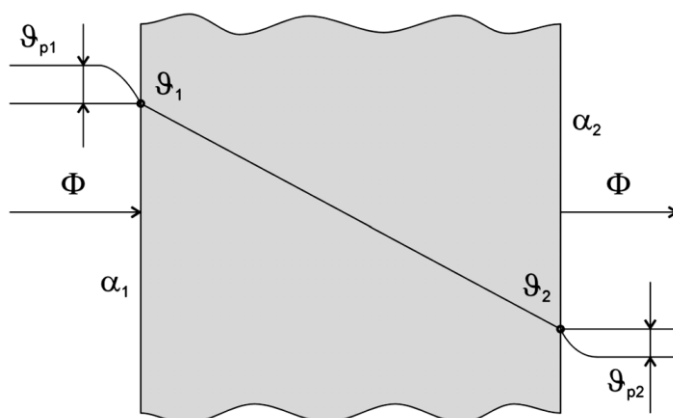
Tab. 2.1: Hodnoty součinitele přestupu tepla[2]

	$\alpha_{\min} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	$\alpha_{\max} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
<b>klidný vzduch</b>	12,5	125
<b>proudící vzduch</b>	40	2100
<b>proudící kapalina</b>	8400	21000
<b>vroucí kapalina</b>	16800	25100
<b>kondenzující páry</b>	29000	50000

Přenos tepla prouděním patří k nejobtížnějším výpočtovým problémům v tepelné technice. Zabývá se jím mnoho odborné literatury. V důležitých případech je nejlépe, určíme-li součinitel přestupu tepla  $\alpha$  sami měřením na modelu co nejvíce odpovídajícím našemu případu při použití uvedených vztahů, v nichž se  $\alpha$  vyskytuje. Při přestupu tepla prouděním (obr. 2.1) platí Newtonův zákon:

$$\Phi = \alpha_1 \cdot (\vartheta_{p1} - \vartheta_1) \cdot S \quad (2.13)$$

$$\Phi = \alpha_2 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_{p2}) \cdot S \quad (2.14)$$



Obr. 2.1 Přenos tepla prouděním

Mezi teplotou prostředí a teplotou povrchu je i v ustáleném stavu teplotní rozdíl daný tím, že na povrchu stěny lpí vždy tenká vrstva plynu nebo kapaliny, která se neúčastní proudění. Touto vrstvou prochází tepelný tok pouze vedením, a protože tepelná vodivost plynů a kapalin je malá, nastává zde teplotní skok.

### 2.3. Přenos tepla sáláním[1]

Přenos tepla sáláním se liší od vedení a proudění jiným mechanismem přenosu. Přenos energie, respektive tepla, se děje pomocí elektromagnetických vln v celém rozsahu vlnových délek. Elektromagnetické vlnění je vytvářeno každým neprůzračným tělesem o teplotě větší než 0 K a zároveň okolní záření pohlcuje.

Záření lze rozložit na jednotlivé složky, kterým odpovídají jednotlivé vlnové délky, a můžeme tak získat vyzařované spektrum.

Na těleso rovněž dopadá tepelný tok od ostatních těles v prostoru. K ohřevu tělesa pochopitelně dochází, přijímá-li ze svého okolí více energie než samo vyzáří a naopak. Množství vyzařované energie je úměrné ploše aktivního povrchu tělesa a čtvrté mocnině jeho termodynamické teploty. Je rovněž závislé na charakteru povrchu tělesa. Tok energie dopadající na těleso lze rozdělit na tři části:

- 1)  $A$  – pohlcený tok ( $A$  je poměrná pohltivost – absorpce),
- 2)  $B$  – odražený tok ( $B$  je poměrná odrazivost – reflexe),
- 3)  $C$  – prostupující tok ( $C$  je poměrná propustnost).

Musí platit:

$$A + B + C = 1 \quad (2.15)$$

Lze definovat tyto extrémy:

$A = 1$  ..... absolutně černý povrch (celá energie tepelného toku je tělesem pohlcena)

$B = 1$  ..... absolutně bílý povrch (veškerá energie je tělesem odražena)

$C = 1$  ..... průzračné (průteplivé) prostředí – dvouatomové plyny a vzduch

$C = 0$  ..... tepelně neprůzračné prostředí – např. kovy

Tyto koeficienty mohou být závislé na frekvenci elektromagnetické vlny, proto je možné definovat jejich spektrální hodnoty, a pro všechny vlnové délky musí platit:

$$A_\lambda + B_\lambda + C_\lambda = 1 \quad (2.16)$$

## 2.4. Nepřímý odporový ohřev[3]

Při této metodě odporového ohřevu se Joulovo teplo generuje ve speciálně upravených odporových vodičích - výhřevných člancích a na povrch vsázky se přenáší zejména sáláním a prouděním, zřídka vedním. Způsob této vnější výměny tepla je možné použít na rozdělení pecí podle velikosti teploty v pracovní komoře:

- 1) pece nízkoteplotní (do 600°C) s převládajícím prouděním tepla na povrch vsázky
- 2) pece středoteplotní (od 600°C do 1200°C) s převládajícím sáláním tepla
- 3) pece vysokoteplotní (nad 1200°C) s podstatně převládajícím sáláním, případně výlučně sáláním, např. ve vakuových pecích

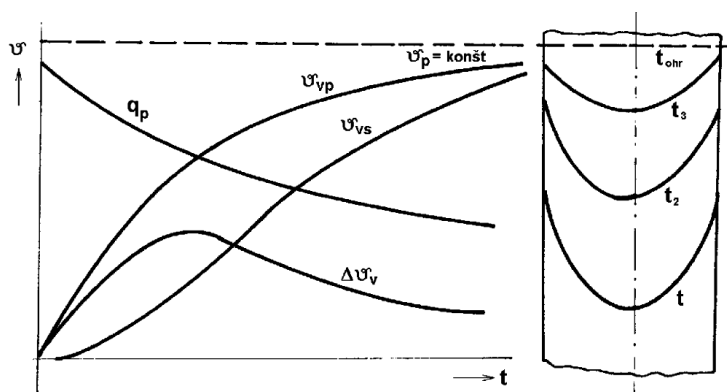
Přenos tepla z povrchu vsázky do vnitřních vrstev se nazývá vnitřní výměna tepla. Podle technologického režimu, resp. skupenské fáze vsázky se vnitřní výměna uskutečňuje vedením, prouděním nebo jejich kombinací.

Pro analýzu tepelných polí a ohřevu vsázky nepřímým způsobem jsou rozhodující hraniční podmínky výměny tepla na jejím povrchu a tzv. tepelná velikost vsázky ovlivňující rychlost změny teploty ve vsázce nebo gradient teploty. Tepelná velikost vsázky závisí na skutečné velikosti a tepelné vodivosti. Ve většině praktických úlohách se hodnotí Biotovým číslem (2.20). Jestliže  $Bi < 0,25$  (0,5) je vsázka tepelně drobná, v tomto případě pro výpočet doby ohřevu vsázky není potřebné počítat s vnitřní výměnou tepla (nestacionární tepelné pole vsázky při jejím ohřevu). Jestliže  $Bi > 0,25$  (0,5), vsázka je tepelně masivní. Vnitřní výměna tepla ovlivňuje dobu ohřevu a výpočet parametrů pece, resp. technologický proces s nepřímým odporovým ohřevem vyžaduje analýzu nestacionárního teplotního pole vsázky.

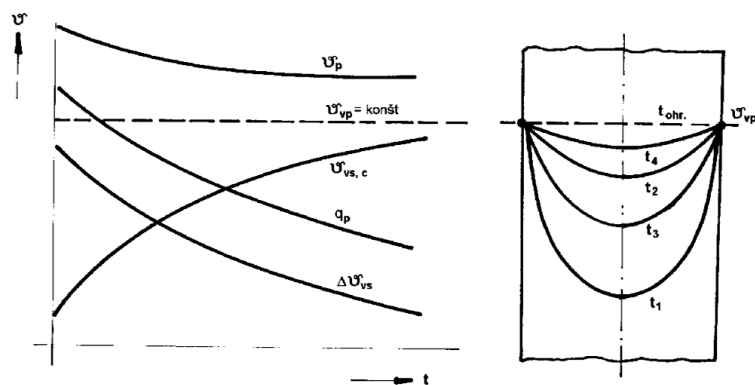
Od hraničních podmínek výměny tepla na povrchu vsázky se odvozují teplotní režimy nepřímého ohřevu. Uplatňují se tři druhy teplotních režimů, resp. jejich kombinace.

- 1) teplotní režim při konstantní teplotě pece;  $\vartheta_p = konst.$
- 2) teplotní režim při konstantní teplotě na povrchu vsázky;  $\vartheta_{vs,p} = konst.$
- 3) teplotní režim při konstantní hustotě tepelného toku na povrchu vsázky;  $q_{vs,p} = konst.$

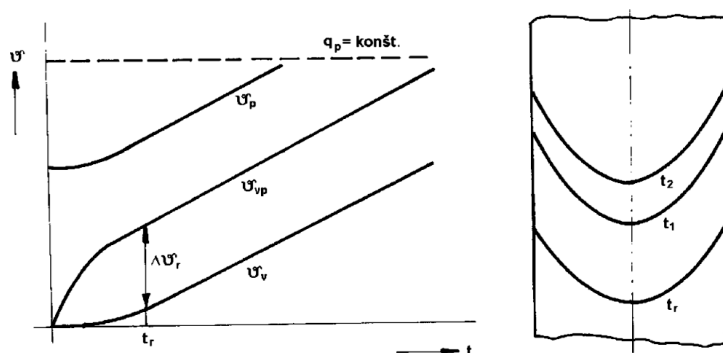
Na obr. 2.2, 2.3, 2.4 v uvedené posloupnosti jsou znázorněny časové průběhy teplot a rozložení teplot v průřezu symetricky ohříváné vsázky ve tvaru desky.



Obr. 2.2 Teplotní režim a rozložení teploty u oboustranně ohříváné desky při  $\vartheta_p = konst.$



Obr. 2.3 Teplotní režim rozložení teploty u oboustranně ohřívané desky při  $\vartheta_{vs,p} = \text{konst.}$



Obr. 2.4 Teplotní režim a rozložení teploty u oboustranně ohřívané desky při  $q_{vs,p} = \text{konst.}$

Pro vyjádření matematických modelů vnitřní tepelné výměny nepřímého ohřevu vsázky zvolíme ohřev desky v teplotním režimu  $\vartheta_p = \text{konst.}$  v alternativách tepelně masivní a tepelně drobné vsázky.

## 2.5. Matematický model ohřevu tepelně masivní vsázky při $\vartheta_p = \text{konst.}$ [3]

Předpokládejme oboustranný symetrický ohřev desky, umístěné v odporové peci tak, že její teplotní pole je možné považovat za jednorozměrné, tj. teplotní funkce má tvar  $\vartheta = \vartheta(x, t)$ . Deska necht' je popsána potřebnými fyzikálními ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$ ,  $a$ ) a geometrickými parametry (tloušťkou  $2s$ ). Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  je známý.

Pro řešení úlohy uplatníme diferenciální rovnici vedení tepla ve tvaru:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot c \cdot \vartheta) + \text{div} \bar{q}_v = q_z, \quad (2.17)$$

která pro jednorozměrné pole bude

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad (2.18)$$

Když na rovnici (2.18) aplikujeme analytickou metodu separace proměnných a zároveň zohledníme symetrický ohřev, její všeobecné řešení bude:

$$\vartheta(x, t) = C \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \exp(-a \cdot k^2 \cdot t), \quad (2.19)$$

kde  $C$  je integrační konstanta

$k$  je konstanta vyplývající z použité metody

Partikulární řešení funkce (2.19) vychází z počáteční podmínky, tj. v čase  $t = 0$  je  $\vartheta(x, 0) = \vartheta_0$  a hraniční podmínky 3. druhu pro tloušťku desky  $2s$ .

$$-\lambda \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_{x=\pm s} = \alpha [\vartheta_p - \vartheta(\pm s, t)] \quad (2.20)$$

V kritériální formě má tvar:

$$\Theta = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_0} = \frac{\vartheta_p - \vartheta(x, t)}{\vartheta_p - \vartheta_0} = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \varepsilon_n}{\varepsilon_n + \sin \varepsilon_n \cdot \cos \varepsilon_n} \cdot \cos(\xi \cdot \varepsilon_n) \exp(-\varepsilon_n^2 \cdot Fo) \quad (2.21)$$

Výsledek ve tvaru (2.21) vyjadřuje pole proměnných teplotních rozdílů v libovolném čase  $Fo$  a bodě ohřívání vsázky  $\xi$ . Význam jednotlivých členů v rovnici (2.21) je následovný:

$\Theta$  - poměrný teplotní rozdíl

$\xi$  - poměrná souřadnice teplotního pole desky  $\xi = x/s$

$Fo$  - Fourierovo kritérium (bezrozměrný čas)

$$Fo = \frac{\alpha \cdot t}{s^2} \quad (2.22)$$

$\varepsilon_n$  - jsou kořeny transcendentní rovnice

$$\frac{\varepsilon}{Bi} = \cot \varepsilon \quad (2.23)$$

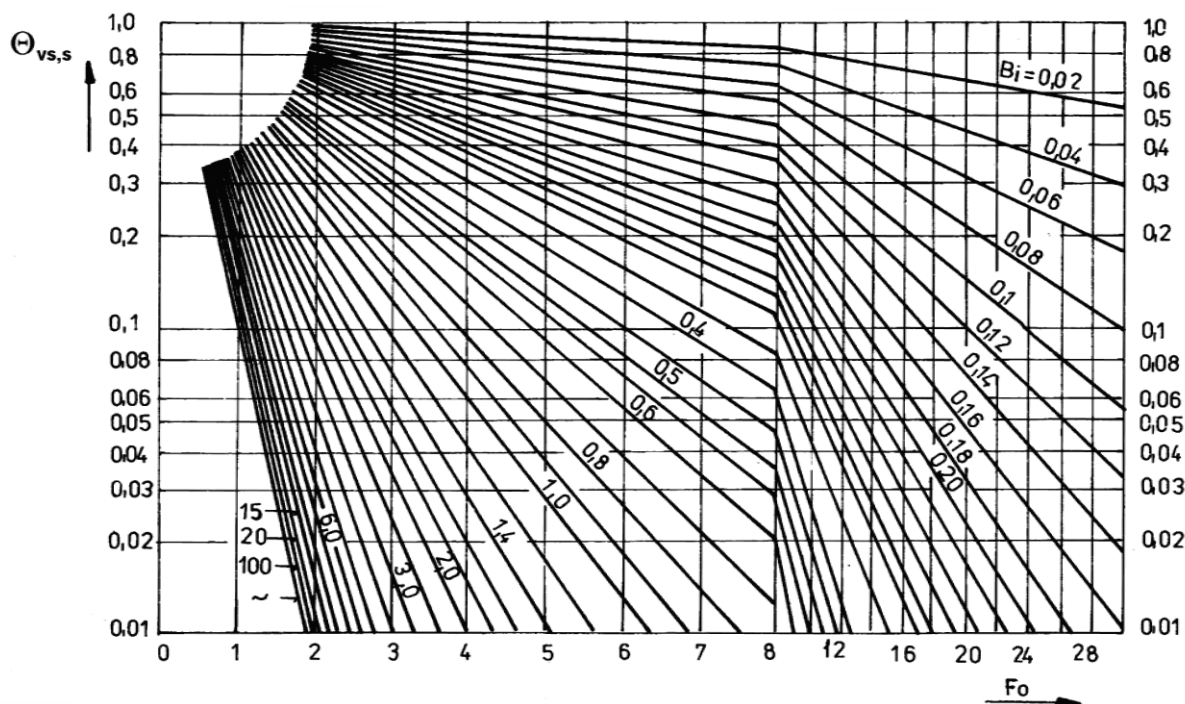
$Bi$  - Biotovo kritérium

$$Bi = \frac{\alpha \cdot s}{\lambda} \quad (2.24)$$

V praktických úlohách postačí vypočítat pole poměrných teplotních rozdílů  $\vartheta(\xi, Fo)$  pro první čtyři kořeny rovnice (2.23). Výsledek (2.21) má výhodu všeobecné platnosti pro rozložení poměrné teploty v čase  $Fo$ , v teplotním poli ohřívání desky. Graficky zobrazené řešení pro rovinu symetrie desky ( $\xi=0$ ) a povrch desky ( $\xi=1$ ) jsou univerzální (obr. 2.5 a 2.6).

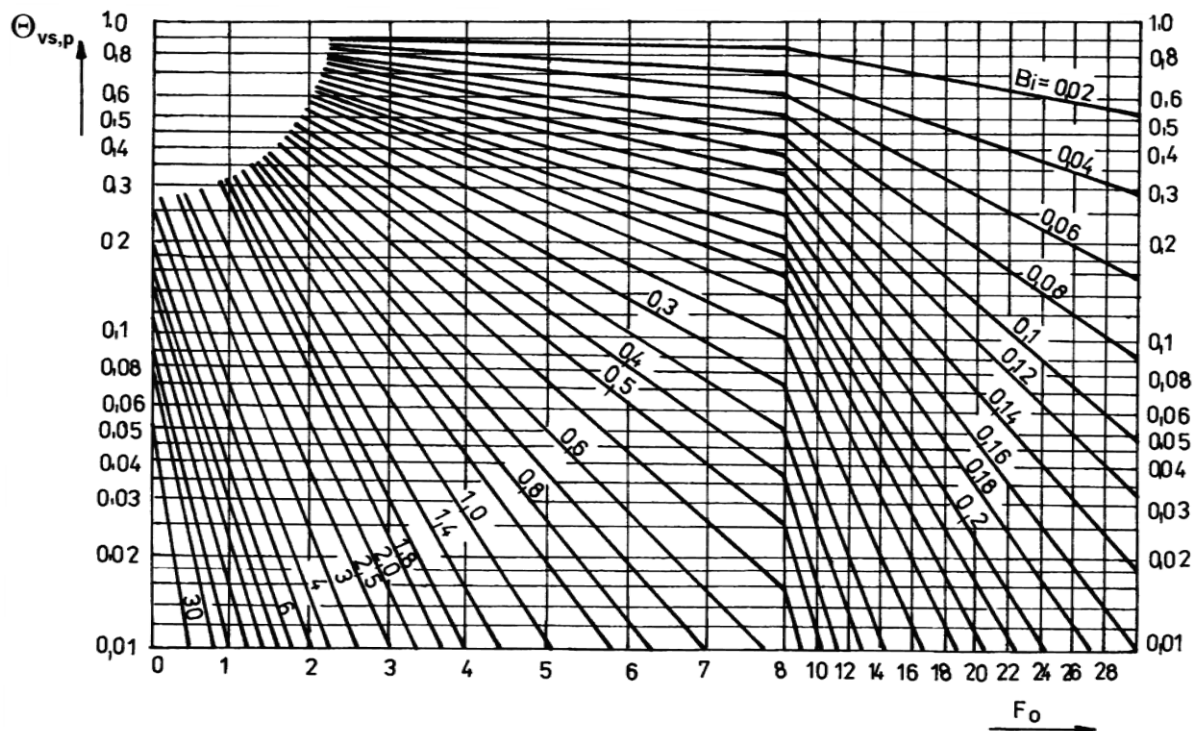


### DIAGRAM PRO VÝPOČET TEPLoty V OSE DESKY



Obr. 2.5 Závislost poměrné teploty v ose symetrie desky při  $\vartheta_p = \text{konst.}$ , od  $Fo$  a  $Bi$

### DIAGRAM PRO VÝPOČET TEPLoty POVRCHU STĚNY



Obr. 2.6 Závislost poměrné teploty na povrchu desky při  $\vartheta_p = \text{konst.}$ , od  $Fo$  a  $Bi$

Podobné výsledky dává řešení předmětné diferenciální rovnice pro jiný souřadnicový systém, či jinou zadanou hraniční podmínku (teplotní režim), Protože výsledky řešení a grafického zobrazení jsou uvedené v kritériální formě mají stejnou platnost i při ochlazování vsázky.

## 2.6. Matematický model ohřevu tepelně drobné vsázky při $\vartheta_p = \text{konst.}$ [3]

Hodnota Biotova kritéria se může pohybovat v rozmezí  $Bi \in < 0, \infty >$ . Pro mezní hodnotu  $Bi = \infty$  ( $\alpha = \infty$ ) se teplotní poměry při ohřevu, resp. ochlazování vsázky změní tak, že teplotní režim s konstantní teplotou pece se redukuje na režim s konstantní teplotou na povrchu vsázky. Je to režim s velmi intenzivní vnější výměnou tepla, doba ohřevu vsázky závisí výlučně na intenzitě vnitřní výměny tepla (od rozměrů, tvaru a tepelné vodivosti vsázky). Prakticky se považuje za tento režim takový, pro který je  $Bi \gg 1$ , jmenovitě  $Bi \geq 100$ .

Druhá mezní hodnota Biotova kritéria je  $Bi = 0$ , které reálně odpovídá ohřev, resp. ochlazování materiálu malých rozměrů s vysokou tepelnou vodivostí, při současně malé hodnotě součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . Když zmenšujeme charakteristický rozměr vsázky a zvětšujeme její tepelnou vodivost, tak se zároveň zmenšuje i teplotní rozdíl mezi povrchem a libovolným bodem uvnitř vsázky. Pro mezní hodnotu  $\lambda = \infty$  ( $\lambda / \alpha = \infty$ ) se teplotní rozdíl rovná nule, teplotní čáry jsou přímky kolmé na osu symetrie vsázky. Přibližně takový stav nastává ve vsázce libovolného tvaru při  $Bi \ll 1$ , tedy v případě, kdy je vsázka tepelně drobná.

Teplotní funkce pro ohřev, resp. ochlazování tepelně drobné vsázky tvaru rovinné desky, vyjádříme z výsledku z předcházející kapitoly. Např. vyjádřením rovnice (2.21) pro  $\xi = 1$  ( $x = s$ ) a  $\xi = 0$  ( $x = 0$ ) získáme poměr funkcí teplotních rozdílů v rovinné desce.

$$\frac{\Delta\vartheta(1, Fo)}{\Delta\vartheta(0, Fo)} = \cos \varepsilon_i \quad (2.25)$$

Nakolik jsou pro Biotovo kritérium s hodnotami  $Bi \ll 1$  kořeny transcendentní rovnice  $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \varepsilon = Bi$  stejně velmi malé ( $\varepsilon \ll 1$ ), bude  $\cos \varepsilon_i = 1$ , tedy pro výše uvedené funkce platí:

$$\Delta\vartheta(1, Fo) \doteq \Delta\vartheta(0, Fo), \text{ resp. } \Delta\vartheta(s, t) \doteq \Delta\vartheta(0, t) \quad (2.26)$$

Z rovnice (2.26) vyplývá, že teplota podél souřadnice, ve směru, ve kterém se tenká rovinná deska ohřívá nebo ochlazuje je rozložena rovnoměrně. K stejným výsledkům dojdeme analýzou teplotních funkcí pro vsázku ve tvaru válce, resp. koule.

Při splnění těchto podmínek je možné vyjádřit časové změny teplotních rozdílů, resp. teplot ve vsázce libovolného tvaru všeobecnou bilanční rovnicí

$$\alpha \cdot F \cdot \Delta\vartheta(t) \cdot dt = -V \cdot \rho \cdot c \cdot d(\Delta\vartheta), \quad (2.27)$$

kde  $F$  je plocha povrchu vsázky [ $\text{m}^2$ ] a  $V$  její objem [ $\text{m}^3$ ].

Aplikováním rovnice (2.27) na předmětnou desku tloušťky  $2s$  bude

$$\alpha \cdot (1 \times 1) \cdot \Delta\vartheta \cdot dt = -(s \times 1 \times 1) \cdot \rho \cdot c \cdot d(\Delta\vartheta) \quad (2.28)$$

resp.

$$\frac{d(\Delta\vartheta)}{\Delta\vartheta} = -\frac{\alpha}{s \cdot \rho \cdot c} \cdot dt \quad (2.29)$$

Integrováním rovnice (2.29) v hranicích  $t \in < 0, t > a$   $\vartheta \in < \vartheta_0, \vartheta_t >$  dostaneme:

$$\ln \frac{\Delta\vartheta_t}{\Delta\vartheta_0} = -\frac{\alpha \cdot t}{s \cdot \rho \cdot c} = -Bi \cdot Fo \quad (2.30)$$

resp.

$$\Delta\vartheta_t = \Delta\vartheta_0 \cdot \exp(-Bi \cdot Fo) \quad (2.31)$$

V poslední rovnici  $\Delta\vartheta_0 = \vartheta_p - \vartheta_0$  je teplotní rozdíl mezi teplotou pece a teplotou vsázky v čase  $t=0$ ,  $\Delta\vartheta_t = \vartheta_p - \vartheta_t$  je teplotní rozdíl v čase  $t$ . Rovnice (2.31) vyjadřuje teplotní funkci v procesu ohřevu, resp. ochlazování tenké rovinné desky. Mimo jiné umožňuje vypočítat dobu ohřevu pro zadanou konečnou teplotu desky  $\vartheta_k$  ( $\Delta\vartheta_k = \vartheta_p - \vartheta_k$ ).

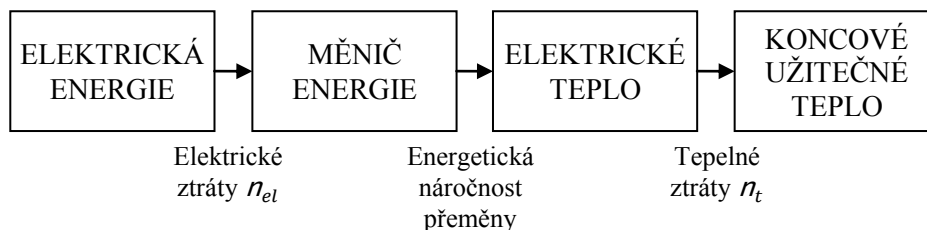
$$t_0 = \frac{s^2}{\alpha \cdot Bi} \cdot \ln \frac{\Delta\vartheta_0}{\Delta\vartheta_k} \quad (2.32)$$

Podobné vztahy lze odvodit pro tepelně drobnou vsázku ve tvaru válce a koule.

Analýzy teplotního pole vsázky ohřívané přímým nebo nepřímým způsobem je východisko pro optimalizaci tepelných režimů a výpočet elektrických parametrů odporových pecí. S ohledem na složitější matematický aparát a časovou náročnost se běžně v praxi často nahrazují jednoduššími metodami a empirickými zkušenostmi, které zpravidla nevedou k racionálnímu provozu těchto zařízení. Bez důsledné analýzy ohřevu vsázky není možná skutečná optimalizace konstrukčních a provozních parametrů pece.

## 2.7. Energetická bilance elektrotepelné konverze[3]

Přeměna elektrické energie na užitečné teplo se uskutečňuje v konverzním systému – měniči energie. Všeobecně, bez ohledu na realizovaný fyzikální princip přeměny se dá tato konverze znázornit blokovým schématem na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Přeměna elektrické energie na tepelnou

Skutečná energetická náročnost přeměny závisí:

- na velikosti teoretické energetické náročnosti (konstantní)
- na velikosti elektrických ztrát, určující elektrickou účinnost konverzního systému

$$\eta_{el} = \frac{P_{už,el}}{P_{příkon}} \quad (2.33)$$

- na velikosti tepelných ztrát určujících tepelnou účinnost konverzního systému

$$\eta_t = \frac{P_{už,t}}{P_{už,el}} \quad (2.34)$$

Celková energetická účinnost je definována součinem obou účinností

$$\eta_c = \eta_{en} = \eta_{el} \cdot \eta_t = \frac{P_{už,t}}{P_{příkon}} \quad (2.35)$$

Rovnice energetické bilance přeměny, vyjádřena výkony bude:

$$P_{příkon} = P_{už,t} + P_{st,el} + P_{st,t} = P_{už,t} + P_{st,c} \quad (2.36)$$

Protože teoretická spotřeba elektrické energie konvertované na koncovou teplotu je konstantní, skutečnou spotřebu můžeme minimalizovat jen cestou zvyšování celkové účinnosti, tj. snižováním celkových ztrát  $P_{st,c}$ . V tom spočívá všeobecný princip racionalizace spotřeby elektrické energie.

Reálný elektrotepelný konverzní systém je možné simulovat neizolovanou **td** soustavou, tj. soustavou schopnou energetické interakce s okolím. Nezávisle od možných energetických změn ve vnitřku **td** soustavy, v souladu se zákonem zachování energie, je součet vnitřní energie soustavy a energie okolí vždy konstantní

$$W_{td} + W_{ok} = konst. \quad (2.37)$$

Ze vztahu (2.37) zároveň vyplývá, že jestli mezi soustavou a okolím dochází k výměně energie v čase  $d\tau$ , platí pro vyjádření energetické bilance diferenciální rovnice

$$dW_{td} + dW_{ok} = 0 \quad (2.38)$$

resp. pro konečný časový úsek  $\Delta t$  diferenční rovnice:

$$\Delta W_{td} + \Delta W_{ok} = 0 \quad (2.39)$$

Rovnice (2.38 a 2.39) jsou všeobecnými rovnicemi energetické bilance přírůstek (úbytek) energie **td** soustavy v daném čase se rovná úbytku (přírůstku) energie okolí v tom samém čase.

## 2.8. Konstrukce elektrické odporové pece s nepřímým ohřevem

Standardní odporovou pec s nepřímým ohřevem tvoří tyto základní části:

- 1) žáruvzdorná vyzdívka
- 2) tepelná izolace
- 3) skříň pece
- 4) topné články
- 5) podávací mechanismy a jejich pohony

Některé pece jsou vybaveny zařízením pro výrobu ochranné atmosféry nebo vakua. Základní výbavou pecí jsou přístroje pro regulaci a měření teploty.

Ochranný prostor pece je ohraničen žáruvzdornou vyzdívkou. Tato vyzdívka musí při běžném provozu odolávat vysokým teplotám, proto musí být dostatečně pevná a její složení musí zajišťovat vysokou chemickou stabilitu. Nejvíce používaná je žáruvzdorná vyzdívka tvořená ze šamotových dílů, složených z 38 % až 44 % oxidu hlinitého  $Al_2O_3$ , zbytek je tvořen oxidem křemičitým  $SiO_2$ .

Tepelné izolace jsou tvořeny z porézních materiálů (magnezit, struska, oxid hlinitý, skleněná vata). Skříň je obvykle zhotovena z ocelového plechu a ocelových profilů. Některé součásti se vyrábějí

z litiny a ocelolitiny. Tyto součásti se nacházejí za tepelnou izolaci, kde je již normální teplota, proto nejsou na ně kladeny žádné speciální požadavky. Vysoké nároky jsou zato kladeny na materiály pro topné články. Tyto materiály by měly splňovat následující požadavky:

- 1) odolnost proti žáru při pracovní teplotě článku
- 2) velká mechanická pevnost za tepla
- 3) odolnost proti chemickým vlivům
- 4) velké rezistivity pro možnost použití větších průřezů a přiměřených délek vodičů a pro umožnění přímého připojení k síti
- 5) malý teplotní součinitel odporu, který zajistí malý rozdíl mezi odporem článku za studena a za tepla
- 6) stálost rezistivity po celou dobu životnosti článku
- 7) malá tepelná roztažnost
- 8) dobrá zpracovatelnost do různých tvarů

Vzhledem k tomu, že tyto požadavky jsou dosti náročné, tak v praxi se daří současně splnit pouze některé a to za cenu jistého kompromisu.

Materiály pro topné články se dělí do dvou základních skupin:

- 1) materiály kovové
- 2) materiály nekovové

## 2.9. Materiály pro topné články kovové[1]

Mezi kovové materiály patří slitiny Ni, Cr, Fe, Al nemagnetické a magnetické, čisté kovy, ocel a speciální slitiny.

### Austenitické slitiny

Austenitické slitiny jsou nemagnetické, tzv. chromniklové. Pro topné články se používá slitina Ni+Cr, a slitina Ni+Cr+Fe. Tyto slitiny jsou nejjakostnější, mají dobrou žárovzdornost, odolávají častým zapnutím a vypnutím. Dobře se svařují a tvarují. Mají velkou rezistivitu a malý teplotní součinitel odporu, nestárnou, jsou stálé.

### Feritické slitiny

Feritické slitiny jsou magnetické slitiny Cr+Al+Fe bez niklu, vysoce žáruvzdorné s větší rezistivitou než skupina předešlá. Patří sem slitiny s obchodními názvy: Kanthal, Alsichrom, Alkrothal, Chromal, Aluchrom, Thermal aj. Rezistivity drátů z těchto slitin jsou kolem  $1,4 \mu\Omega/\text{m}$  při  $20^\circ\text{C}$  a mění se s teplotou velmi málo. Tyto materiály jsou použitelné pro pracovní teploty až do  $1375^\circ\text{C}$ .

### Čisté kovy

Čisté kovy jsou drahé, těžkotavitelné, např. platina, wolfram a molybden. Používají se pro topné články laboratorních nebo jiných speciálních pecí, kde se požaduje značně vysoká teplota.

Platina neoxiduje, ale intenzívně se nauhličuje, nemůže se použít v redukční atmosféře. Protože se její odpor mění značně s teplotou, způsobí zapnutí za studeného stavu velký proudový náraz.

Wolfram je velmi křehký. Topné články jsou obvykle ve tvaru trubky, jejíž vnitřní prostor je

přímo pracovním prostorem, který se chladí vodou. Wolframové topné články pracují ve vakuu nebo v ochranné atmosféře až do 2600 °C.

Molybden se používá pro teploty 1400 °C až 2000 °C. Vyžaduje ochrannou atmosféru (např. páry lihu nebo vodík), ve vakuu se při teplotě 1650 °C rozprašuje.

### **Ocel a speciální odporové slitiny**

Ocelový drát lze použít až do 900 °C, avšak jen ve vodíkové atmosféře. V normální atmosféře jen do 400 °C. Je levný, používá se v sušících pecích. Konstantan (56% Cu + 44% Ni) a Nikelin (65% Cu + 34% Ni + 1% Fe) jsou speciální slitiny, jejichž odpor se téměř s teplotou nemění. Používají se hlavně v měřicí a regulační technice. Dají se však také použít pro topné články do malých spotřebičů a pro nízké teploty.

## **2.10. Materiály pro topné články nekovové[1]**

Pracovní teploty kovových topných článků dosahují nejvýše 1375 °C, proto se hledaly materiály, které při stejných základních vlastnostech jako u kovových mohou pracovat v normální atmosféře při teplotách vyšších.

### **Karbid křemíku (SiC)**

Karbid křemíku je nejčastěji používaný nekovový materiál pro topné články s obchodními názvy Silit, Globar, Crusilir, Cesiwid aj. Rezistivita je značně vyšší než u kovových materiálů (0,6 – 3,0 mΩ/m), což umožňuje topné články zhotovovat např. ve tvaru tyčí se zesílenými konci. Průměry tyčí jsou 1,2 až 5 cm, délky od 8 do 200 cm. Použitelnost topných SiC článků je až do teploty 1500 °C. Teplotní součinitel odporu je asi do 800 °C záporný, nad 800 °C kladný. Doba životnosti topných článků je od 3000 do 10000 pracovních hodin.

### **Cermetové články**

Jsou vyráběny práškovou metalurgií. Základním materiálem je směs molybdenitu křemičitanů ( $\text{MoSiO}_2$ ) s oxidem křemičitým ( $\text{SiO}_2$ ). Články jsou nejčastěji ve tvaru U (vlásenky). Mohou být také ve tvaru tyčí, trubek.

Pracovní teploty článků jsou 1600 °C až 1700 °C. Žáruvzdornost způsobuje ochranná vrstva  $\text{SiO}_2$  vznikající na povrchu článku za provozu. Cermetové články jsou křehké, nesnášejí otřesy. Jsou odolné proti atmosféře oxidační, dusíkové, argonové a z CO. Škodí jim síra a chlor. Rezistivita se mění značně s teplotou (při 20 °C je  $\rho = 0,25 \mu\Omega \cdot \text{m}$ , při 1600 °C je  $\rho = 3,5 \mu\Omega \cdot \text{m}$ ), proto se připojují přes regulační transformátory.

### **Uhlíkové a grafitové topné články**

Topné články se vyrábějí ve tvaru tyčí, trubek aj. Pracovní teploty jsou až do 2000 °C ve vakuu nebo řízené atmosféře, zabráňující oxidaci. Při normální atmosféře nastává oxidace u uhlíkových článků zhruba od 400 °C, u grafitových zhruba od 600 °C. Rezistivita uhlíku s rostoucí teplotou klesá, např. při teplotě 1400 °C asi na 67 % z plné hodnoty při 0 °C. U grafitu ze 100 % při 0 °C s rostoucí teplotou rezistivita nejprve klesá, při teplotě kolem 400 °C je asi 77 % a potom opět roste. Při 1400 °C je rezistivita asi 96 % původní hodnoty

## 2.11. Vliv provozu odporových pecí na napájecí síť

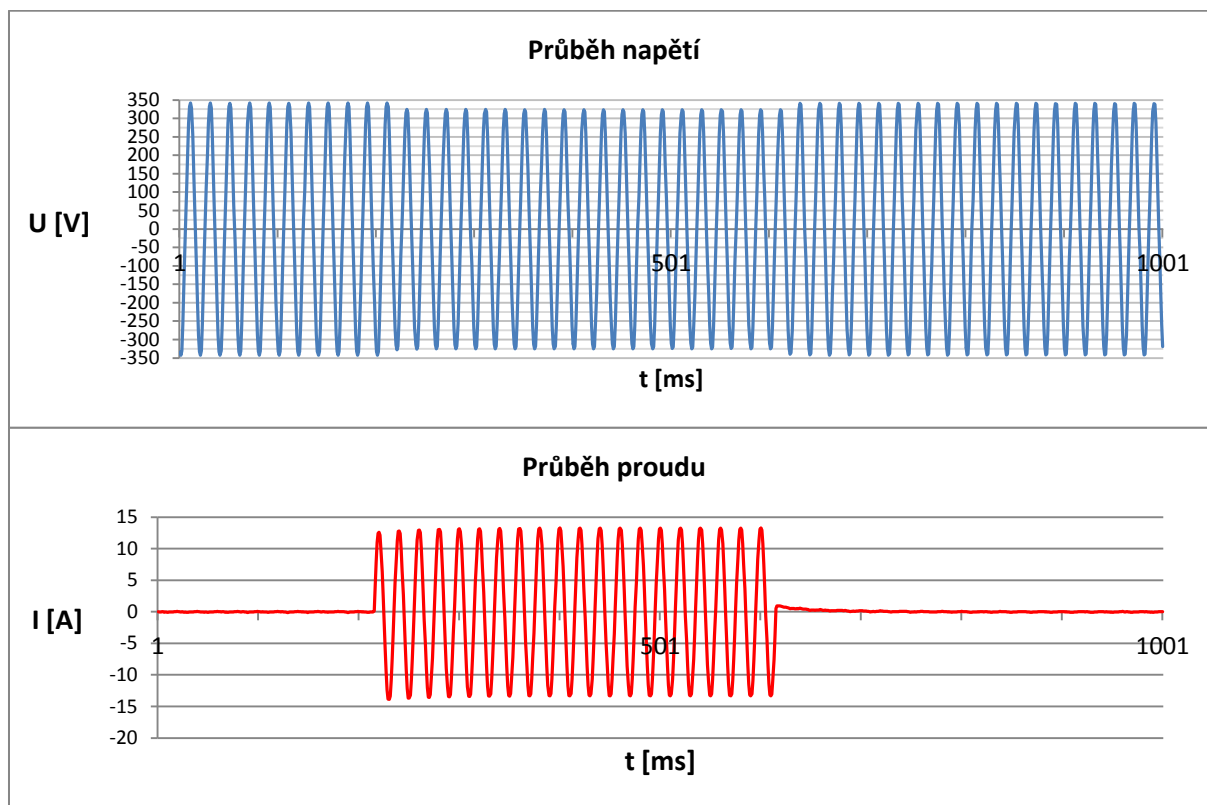
Příkony některých odporových pecí dosahují hodnot až 5000 kW. Při spínání takových zátěží dochází k výrazným poklesům napětí v síti.

Pro udržení konstantní teploty v peci musí docházet k průběžnému zapínání a vypínání topných článků podle požadavku regulátoru. Jedna z možností regulace teploty el. pece je spínání topných článků prostřednictvím stykače, který je ovládán termostatem, což znamená, že k regulaci dochází skokově. Spíná se buď celý příkon, nebo jenom jeho část v závislosti na zvolené kombinaci zapojení jednotlivých článků.

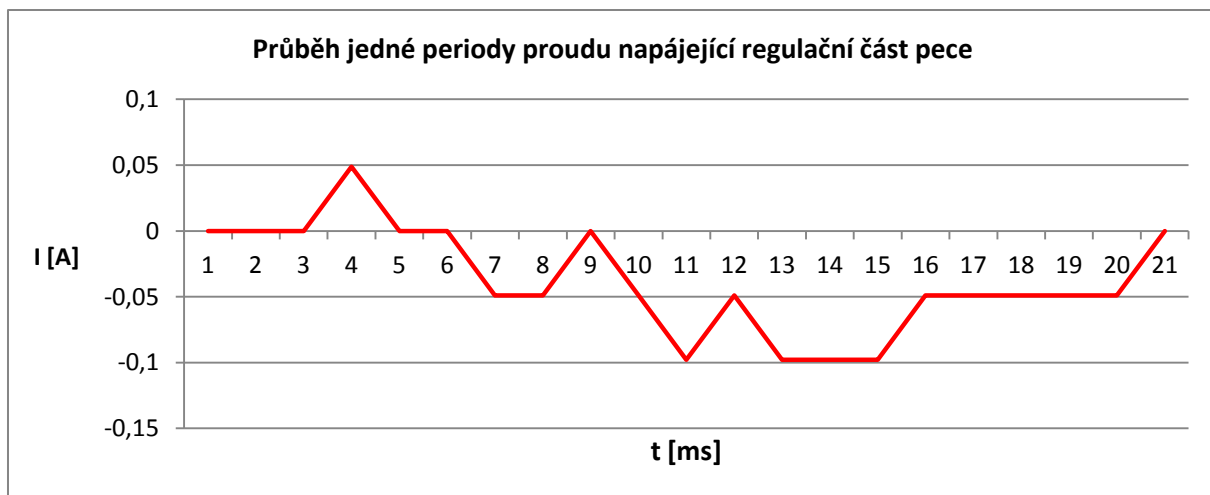
Další možnost regulace je prostřednictvím polovodičové techniky. Obvykle jsou použity pro regulaci polovodičové prvky triaky, jejichž spínací a vypínací schopnost se počítá v řádech  $\mu\text{s}$ , takže dokáže sepnout topné články na velice krátkou dobu, tato regulace teploty el. pece je již plynulá a nazývá se pulzní regulace.

Průběhy napětí a proudu při pulzní regulaci u laboratorní odporové pece MP05-01 jsou zobrazeny na obr. 2.8. Tento průběh je zobrazen za časový úsek jedné sekundy. Zapínání a vypínání topných článků je prováděno triakem při průchodu proudu nulou. Jak je vidět z obrázku, při sepnutí triaku dojde k poklesu maximální hodnoty napětí  $U_{\text{max}}$  až o 20V.

Na obr. 2.9 je znázorněn průběh proudu při chodu pece naprázdno, kdy je napájena pouze řídicí elektronika pece. Vlivem pulzního měniče napájecího elektronické obvodu pece dochází k deformacím procházejícího proudu, tyto deformace jsou způsobeny vyššími harmonickými proudy. Jelikož je odběr při chodu pece naprázdno minimální, tak ovlivnění sítě těmito vyššími harmonickými je zanedbatelné.



Obr. 2.8 Průběh napětí a proudu při pulzní regulaci pece za časový úsek jedné sekundy.



*Obr. 2.9 Zdeformovaný průběh proudu obsahující vyšší harmonické*



### 3. Měření teplot a měření odběru proudu

#### 3.1. Senzory teplot

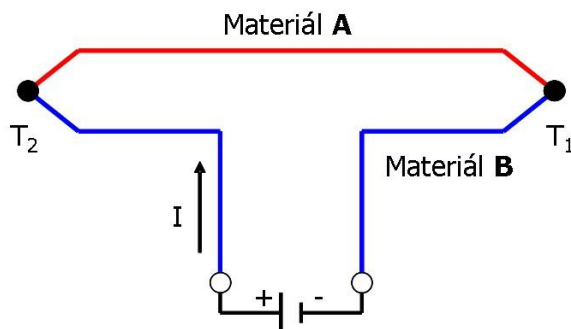
Pro měření teploty se používá v praxi nesčetné množství druhů teplotních senzorů, které můžeme rozdělit následovně:

- 1) kovové odporové senzory teploty
- 2) polovodičové odporové senzory teploty
- 3) monolitické PN senzory teploty
- 4) termoelektrické články
- 5) dilatační teploměry
- 6) speciální dotykové senzory teploty
- 7) teplotní indikátory
- 8) bezdotykové měření teploty

Pro měření teplot vzorku a prostoru laboratorní pece MP05-01 slouží termočlánky. Proto se budeme podrobněji věnovat pouze tomuto druhu teplotních senzorů.

#### 3.2. Termoelektrický jev

Základní podstatou termoelektrických článků je termoelektrický jev zvaný také Seebeckův jev. Podstatou tohoto jevu je přímá přeměna teplotních rozdílů spojů dvou různých kovů na napětí viz. *obr. 3.1*. Čím větší je teplotní rozdíl těchto spojů, tím větší je protékající proud vodiči. A tím větší je napětí v případě, když jeden vodič rozpojíme. Toto napětí se pohybuje řádově kolem několika  $\mu\text{V}$  a je označováno jako termoelektrické napětí. Používá se pro něj veličina elektromotorického napětí  $E$  [V].



*Obr. 3.1 Termoelektrický jev*

Termoelektrický jev způsobují nositelé náboje, které mají na teplejším spoji větší energii a v důsledku toho difundují ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Tento stav způsobuje jednoznačnou převahu kladných nebo záporných nábojů, proto i polarita tzv. Seebeckových koeficientů  $S$  souhlasí se znaménkem těchto nositelů nábojů, kterých je ve vodiči více. Hodnoty koeficientů jsou stanoveny na základě měření kovu vůči olovu nebo platině.

Seebeckovy koeficienty se v technické praxi označují symboly  $\alpha$  a nazývají se termoelektrickými koeficienty. Pro velikost termoelektrického napětí  $E$  platí

$$E = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_B(T) - \alpha_A(T)) dT \quad (3.1)$$

$\alpha_A$  a  $\alpha_B$  jsou Seebeckovy koeficienty kovů A a B,  
 $T_1$  a  $T_2$  jsou teploty spojů.

Seebeckovy koeficienty jsou nelineární a závisejí především na teplotě vodičů, použitém materiálu a jeho molekulární struktuře. Pokud jsou Seebeckovy koeficienty v daném rozsahu teplot přibližně konstantní, může být výše uvedená rovnice (3.1) linearizována:

$$E = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (T_2 - T_1) + 0,5 \cdot (\beta_A - \beta_B) \cdot (T_2 - T_1)^2 \quad (3.2)$$

$$E = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.3)$$

Tab. 3.1 Seebeckovy koeficienty některých kovů vztažené k olovu

Kov	$\alpha$ [ $\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$\beta$ [ $\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-2}$ ]
Antimon	35,6	0,145
Bizmut	-74,4	0,032
Konstantan	-38,1	-0,0888
Měď	2,71	0,0079
Nikl	-19,1	-3,02
Platina	-3,03	-3,25
Železo	16,7	-0,0297

Seebeck na základě svých pokusů sestavil čisté kovy v tzv. Seebeckovu řadu, v následujícím pořadí:

Sb, Fe, Zn, Ag, Au, Sn, Pb, Hg, Cu, Pt, Bi

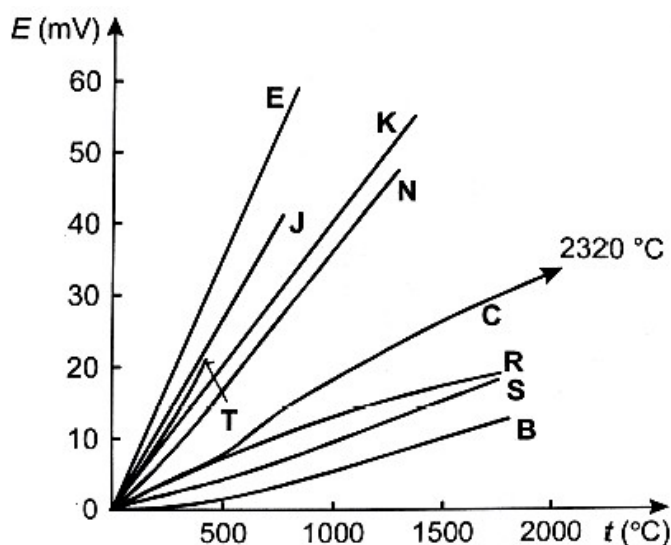
Pokud vytvoříme termoelektrický článek, který bude tvořený dvěma z uvedených kovů, bude podle Seebecka procházet proud ve spoji s vyšší teplotou směrem od následujícího kovu z řady ke kovu v řadě předcházejícímu.

Dále termoelektrické napětí se bude zvětšovat s rostoucím odstupem kovů v Seebeckově řadě. Na základě Seebeckova tvrzení bude mít dvojice Bi – Sb nejvyšší termoelektrické napětí.

### 3.3. Typy termoelektrických článků

Hlavními požadavky pro kvalitní termočlánek je dosáhnout co největšího termoelektrického napětí a udržet v přijatelných mezích nelinearity závislosti termoelektrického napětí na teplotě pro daný teplotní rozsah článku, což nám zajišťuje dlouhodobou stabilitu charakteristiky  $E = f(\Delta t)$ . Toho lze dosáhnout kombinací pouze některých druhů termoelektrických materiálů. Tyto jednotlivé termoelektrické materiály tvořící pár pro výrobu termoelektrických článků jsou ve světě normalizovány.

Dalším důležitým požadavkem je odolnost proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření. Označení jednotlivých termoelektrických článků se dle doporučení IEC provádí velkými písmeny viz. tab. 3.2. Statické charakteristiky vybraných typů termoelektrických článků jsou na obr. 3.2.

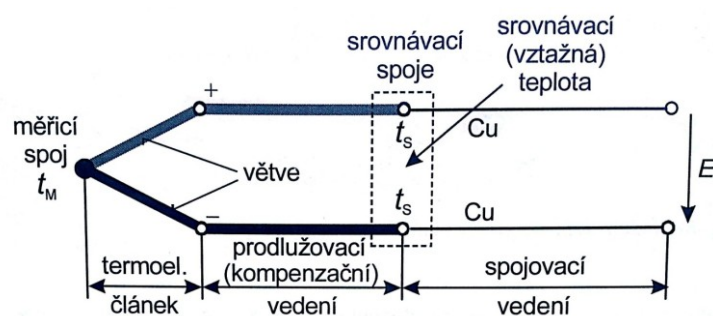


Obr. 3.2 Charakteristiky vybraných termočlánků[4]

Tab. 3.2 Typy termoelektrických článků a základní údaje dle IEC 584.1 (ČSN EN 60584-1) (kromě typu G, C), dlouhodobé a krátkodobé využití závisí od konstrukce snímače a průměru termoelektrických vodičů[4]

KÓD	složení	dlouhodobě (°C) přibližné hodnoty	krátkodobě (°C) přibližné hodnoty	přibližná hodnota $\alpha$ ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) při 100 °C	přibližná hodnota $\alpha$ ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) při 500 °C	přibližná hodnota $\alpha$ ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) při 1000 °C
K	NiCr (+) NiAl (-)	0 až + 1100	-180 až +1350	42	43	39
T	Cu (+) CuNi (-)	-185 až +300	-250 až +400	46	-	-
J	Fe (+) CuNi (-)	+20 až +700	-180 až +750	54	56	59
N	NiCrSi (+) NiSiMg (-)	0 až+1100	-270 až+1300	30	38	39
E	NiCr (+) CuNi (-)	0 až +800	-40 až +900	68	81	-
R	PtRh13 (+) Pt(-)	0 až+ 1600	-50 až+1700	8	10	13
S	PtRh10 (+) Pt(-)	0 až+1550	-50 až+1750	8	9	11
B	PtRh30 (+) PtRh6 (-)	+100 až+1000	+100 až+1820	1	5	9
G (W)	W (+) WRh (-)	+20 až +2320	0 až +2600	5	16	21
C (W5)	WRh5 (+) WRh26 (-)	+50 až+1820	+20 až +2300	15	18	18

### 3.3.1. Popis jednotlivých částí termočlánku



Obr. 3.3 Terminologie měřicího řetězce termoelektrického článku [4]

Na obr. 3.3 vidíme základní části termočlánu, které si postupně popíšeme. Srovnávací teplota je teplota srovnávacího spoje, tato teplota se používá jako teplota referenční, pomocí které se stanovují základní hodnoty termoelektrického napětí.

Prodlužovací a kompenzační vedení, většinou v praxi označované jedním názvem jako kompenzační vedení se používají k elektrickému propojení otevřených větví termočlánu a srovnávacích spojů v případech, kdy větve termočlánu nejsou přímo spojeny se srovnávacími spoji.

Prodlužovací vedení (ve smyslu normy) je vedení vyrobené ze stejného materiálu jako příslušný termočlánek a označuje se např. JX, KX.

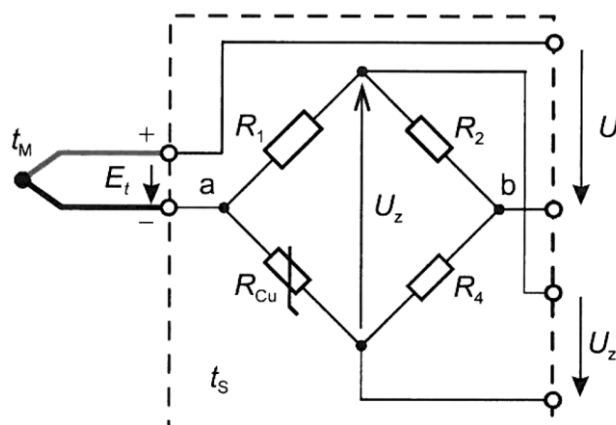
Kompenzační vedení (ve smyslu normy) je vedení vyrobené (většinou z cenových důvodů) z jiných materiálů než je příslušný termočlánek a označuje se např. KC, SC.

Studený (srovnávací) konec termočlánu se musí udržovat na konstantní teplotě. Naměřená teplota totiž závisí na rozdílu teplot obou konců termočlánu. To se řeší použitím termostatu srovnávacích konců, které jsou vyhřívány na konstantní teplotu (obvykle 50°C). Také se může používat pomocného termočlánu, který měří kolísající teplotu srovnávacích konců.

Další možností je použití kompenzační krabice s můstkovým zapojením tepelně závislého odporu.

### Kompenzační zapojení termočlánu

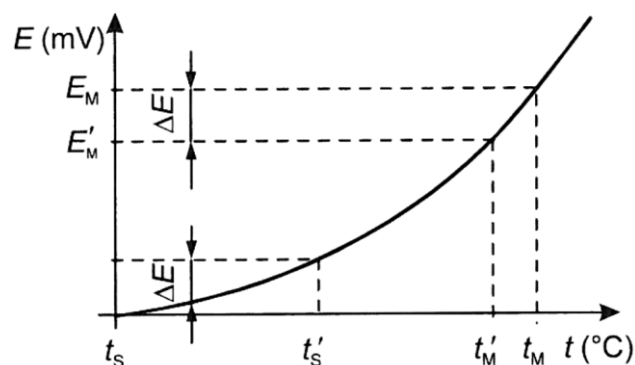
Základem přesného měření termočlánu je konstantní teplota na srovnávacích spojkách. Pokud není dodržena konstantní teplota, dochází k systematické odchylce měření. Tuto odchylku můžeme odstranit použitím kompenzační krabice.



Obr. 3.4 Princip kompenzační krabice ( $U_z$  je napětí zdroje)[4]

Pokud se nerovná srovnávací teplota  $t_s$  vztažné teplotě (u kompenzační krabice obvykle 20 °C), vznikne na měřicí diagonále můstku napětí  $U_{ab}$ , které koriguje systematickou odchylku  $\Delta t = t_M - t'_M$  dle obr. 3.5. Pro dané zapojení platí vztah:

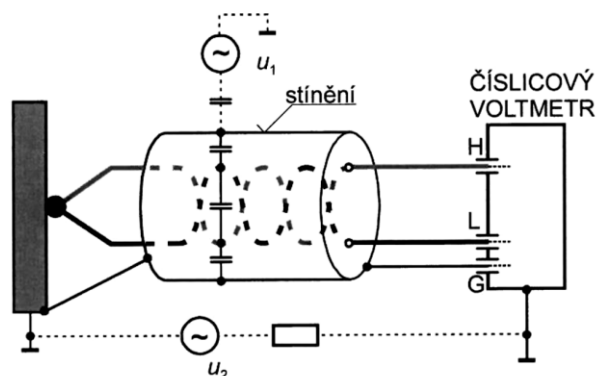
$$\frac{dU_{ab}}{dt_s} = -U_z \frac{R_1}{(R_1 + R_{Cu})^2} \frac{dR_{Cu}}{dt_s} \quad (3.4)$$



Obr. 3.5 Vliv kolísání srovnávací teploty nebo její odchylky od vztažné teploty ( $t'_M$ ,  $E'_M$  jsou naměřené hodnoty, nelinearita charakteristiky je pouze demonstrativní)[4]

### Potlačení vlivu rušení

Termoelektrické napětí se pohybuje v řádech jednotek až desítek milivoltů, aby nedocházelo k chybným měřením je potřeba potlačit rušivé vlivy, mezi které patří hlavně elektrické, magnetické a elektromagnetické pole a vliv parazitních smyček. Příklad vhodného uspořádání měřicího řetězce je na obr. 3.6



Obr. 3.6 Potlačení rušivých vlivů prostředí ( $u_1$ ,  $u_2$  jsou rušivá napětí způsobená kapacitní vazbou a zemní smyčkou)[4]

Magnetické pole potlačíme zkroucením vodičů. Odstíněním zase potlačíme elektrostatické a elektromagnetické pole. Stínění je funkční pouze v případě, že jím neprochází proud a má být v měřicím řetězci připojeno na referenční potenciál, a to z důvodu omezeného stínicího účinku plovoucího stínění. Jako referenční potenciál, můžeme použít skutečnou zem, měřicí zem tvořenou měřicí nulou, společnou nulou napájecích zdrojů, elektronicky vytvořený potenciál nebo kostru přístroje. V případě otevřeného termoelektrického spoje, který je přímo spojen se zemí, je nutné tuto zem zvolit jako referenční potenciál.

### 3.4. Měření proudu

Při měření chodu laboratorní pece se data o velikosti proudu odebíraného pecí získávaly za pomoci klešťového ampérmetru, proto si zde popíšeme jeho princip.

Klešťové měřicí přístroje nám slouží k měření bez přerušení obvodu, zejména elektrického proudu, případně elektrického výkonu, nebo účinníku. Klešťovými přístroji měříme vždy po jednom vodiči i ve vícefázových soustavách.

Klešťové měřicí přístroje jsou v zásadě ve dvou provedeních:

- analogové, kde údaj zobrazuje výchylka ručky
- digitální, kde je údaj zobrazen na displeji

První přístroje měřily jen střídavý elektrický proud. Postupem času se jejich možnosti měření rozšiřovaly i na měření napětí a odporů. Přístroje nabízené v současnosti umožňují měřit celé spektrum elektrotechnických veličin, včetně elektrického proudu.

Původně vycházely přístroje z principu měření pomocí proudového transformátoru, kde je jádro měřicího transformátoru obsaženo v kleštích přístroje a lze jej mechanicky rozpojit, aby bylo možno přes něj provléknout měřený vodič. Takový transformátor se označuje jako sběrníkový proudový měřicí transformátor (průvlečný ampérmetr), používá sběrnici jako vstupní vinutí a na ni se nasune cívka transformátoru jako výstupní vinutí. U průvlečných měřicích proudových transformátorů se vodič, kterým prochází měřený proud (vstupní vinutí) provléká cívkou měniče (výstupní vinutí). Např. dvojnásobným provlečením se převodový poměr změní na polovinu. Jádro transformátoru je ve tvaru kleští a ty se uzavřou kolem vodiče, kterým prochází proud. Protože je součet přicházejícího a odcházejícího proudu nulový, musí kleště při měření obepínat jen jeden vodič. Tento vodič slouží jako primární vinutí měřicího transformátoru proudu. Měřidlo je pak připojeno k vývodům cívky umístěné uvnitř přístroje a navinuté na jádru měřicího transformátoru.



Obr. 3.7 Analogový klešťový ampérmetr

Dnes se pro měření stejnosměrného i střídavého proudu využívá Hallova jevu. Hallovy sondy (generátory) se v současné době používají zejména pro měření magnetické indukce, ale své použití našly i při měření proudu. Dosažitelná přesnost je asi 1% a přístroje lze použít pro měření proudu do kmitočtu asi 25 kHz.

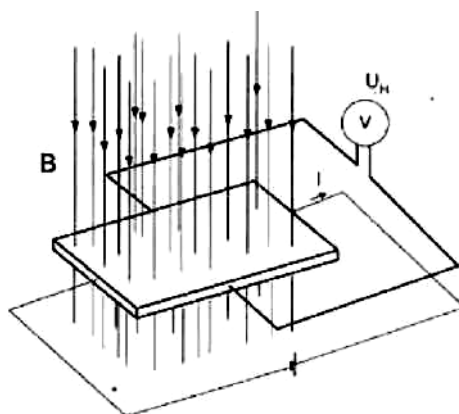
Princip: vložíme-li destičku polovodiče do magnetického pole a necháme-li ji příčně protékat stejnosměrný proud, objeví se na opačných hranách destičky tzv. Hallovo napětí, jehož velikost je dána vztahem:

$$U_H = k \cdot I \cdot B \quad (3.5)$$

$k$  - konstanta závislá na materiálu, tloušťce a struktuře polovodičové destičky

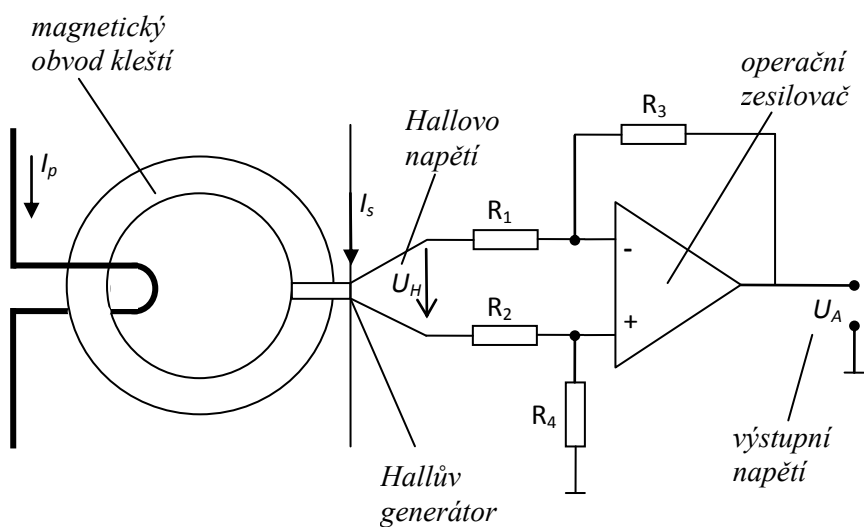
$I$  - stejnosměrný proud protékající destičkou

$B$  - indukce magnetického pole, v němž se destička nachází



Obr. 3.8 Princip Hallovy sondy

#### Praktické řešení zapojení Hallovy sondy pro měření proudu.



Obr. 3.9 Zapojení Hallovy sondy pro měření proudu.





Vodič, kterým protéká měřený proud  $I_p$  (je jedno, jestli je stejnosměrný nebo střídavý) obemkneme kleštěmi magnetického obvodu (magnetický obvod je podobný kleštím běžných klešťových ampérmetrů). Ve vzduchové mezeře je zasunut Hallův generátor, kterým protéká řídicí stejnosměrný proud  $I_s$ . Současně s velikostí měřeného proudu  $I_p$  roste i velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře a tedy i jí odpovídající Hallovo napětí. Toto napětí se zesiluje pomocí operačního zesilovače na výstupní napětí  $U_A$ . Velikost napětí  $U_A$  je přímo úměrná velikosti měřeného elektrického proudu  $I_p$ .

Tímto způsobem lze tedy snadno měřit efektivní hodnoty periodických i neperiodických střídavých proudů i proudy stejnosměrné. Dosažitelná přesnost je asi 1 %, přístroje lze použít pro měření proudu do kmitočtu asi 25 kHz.

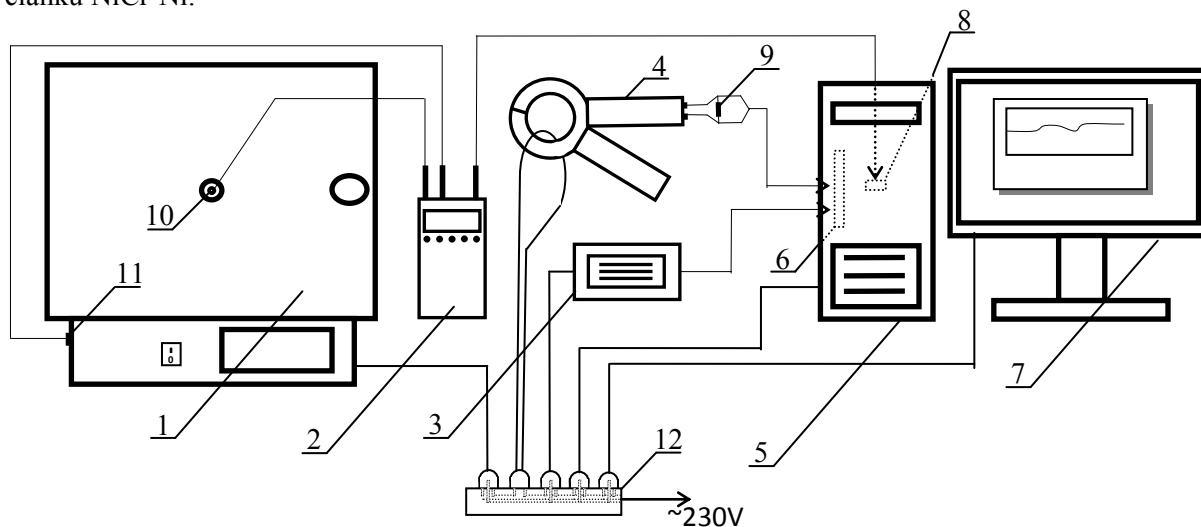
Klešťové ampérmetry s Hallovým generátorem lze použít pro měření proudů 1 mA až 1 MA. Výstup přístrojů bývá výhradně v digitální formě, některé přístroje však mívají i analogový výstup pro připojení osciloskopu (chceme-li zobrazit časový průběh měřeného proudu).

*Obr. 3.10 Klešťový ampérmetr s Hallovou sondou*

#### 4. Návrh měřicího zapojení

Pro vytvoření softwaru pro monitorování chodu laboratorní odporové pece bylo nutné sestavit měřicí obvod a zvolit vhodné měřicí prvky. Pro měření proudu byl použit klešťový ampérmetr Chauvin Arnoux C30 s převodem 1000:1, výstupní proud z ampérmetru byl převeden na napětí za pomoci odporového bočnicku. Pro měření napětí byl použit transformátor s výstupním napětím 4,5 V. Pro převod měřených veličin do digitální formy tak, aby je bylo možno zpracovat pomocí PC byla k tomuto účelu použita měřicí karta PCA-7228AS, která je umístěna ve standardním PC s nainstalovaným operačním systémem Windows XP.

Posledním prvkem měřicího řetězce je již zmíněná laboratorní odporová pec MP05-01, jejíž teplotu snímá universální měřicí přístroj ALMEMO 2390-3 za pomoci dvou kusů termoelektrických článků NiCr-Ni.



- 1) pec MP05-01
- 2) universální měřicí přístroj ALMEMO 2390-3
- 3) měřicí transformátor napětí
- 4) klešťový ampérmetr Chauvin Arnoux C30
- 5) počítač s operačním systémem Windows
- 6) měřicí karta PCA-7228AS
- 7) monitor zobrazující okno programu "PEC"
- 8) sériový port RS-232
- 9) odporový bočník
- 10) termočlánek č. 1 pro měření teploty vsázky
- 11) termočlánek č. 2 pro měření teploty pece
- 12) prodlužovací zásuvka 230 V s upraveným vnitřním zapojením

Obr. 4.1 Schéma měřicího řetězce

## 4.1. Laboratorní pec

Pro monitoring a měření prováděné programem "PEC" byla použita laboratorní pec MP05-01. Pec MP05-01 má plášť z ocelového plechu. Skládá se ze dvou částí spojených šrouby. Ve spodní části pláště je umístěno ovládání a řízení pece, v horní části je keramická mufle s topným vinutím a tepelnou izolací.

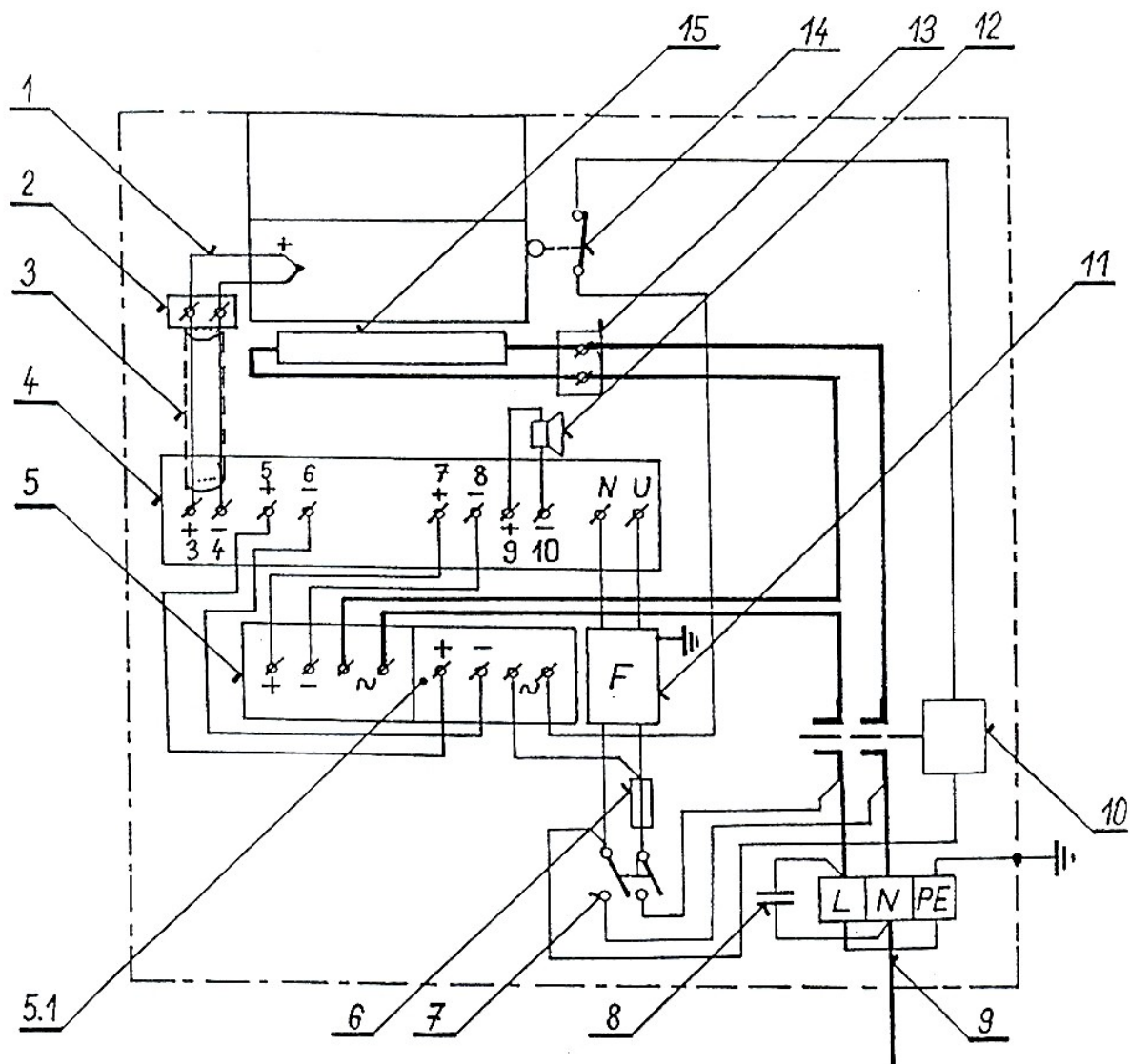
Teplotu v peci snímá termočlánek NiCr-Ni a řídí programovatelný regulátor pomocí výkonového stupně s triakem spínaným v nule. Topné vinutí je připojeno přes kontakty stykače. Cívka stykače je také ovládána dveřním spínačem a ochranným obvodem regulátoru. Připojení k napětí v rozvodné síti je přes zásuvku 16A gumovým kabelem CGSG 3x1,5 mm.



Obr. 4.2 Laboratorní odporová pec MP05-01

Tab. 4.1 Technické parametry laboratorní pece

napájení	230 V, 50 Hz
příkon	2 kW
provozní teplota	max. 1110°C
ochranná teplota	1110°C
počet nastavitelných programů	20
počet úseků v programu	20
doba trvání jednoho úseku	max. 9999 minut
odezva regulace	2,56 s
rozlišovací schopnost	0,1°C
rozměry pece /v-š-h/	490-400-525 mm
pracovní prostor mufle /v-š-h/	95-170-290 mm
váha	27 kg

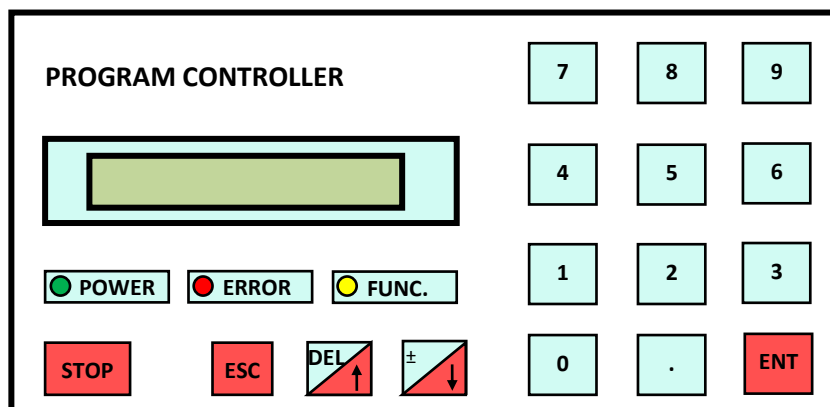


- |                                              |                                                 |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1 - termočlánek NiCr-Ni                      | 9 - přívodní kabel CGSG 3Cx1,5mm <sup>2</sup> , |
| 2 - svorka termočláčku                       | 10 - vzduchový stykač C12 220-230V/50Hz         |
| 3 - kompenzační vedení                       | 11 - odrušovací filtr FS 242 1411               |
| 4 - regulátor DR20K                          | 12 - signalizační jednotka KPE 242              |
| 5 - výkonový spínač BSJ 16/2                 | 13 - svorka topného tělesa                      |
| 5.1 - ochranný stupeň                        | 14 - dveřní vypínač                             |
| 6 - pojistka 0,4 A                           | 15 - topné těleso 2 kW 230V/50Hz                |
| 7 - vypínač ovládání                         |                                                 |
| 8 - odrušovací kondenzátor TC 252 – M1/250 V |                                                 |

Obr. 4.3 Schéma zapojení pece

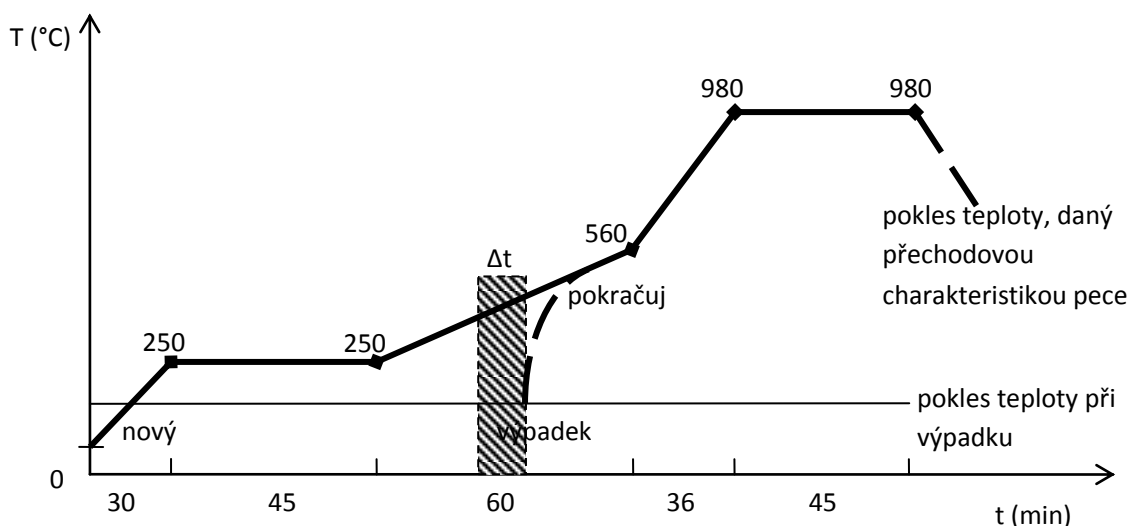
### 4.1.1. Obsluha regulátoru

Obr 4.4 ukazuje pohled na panel regulátoru. Přední panel sdružuje indikační a ovládací prvky regulátoru. Je zde jednořádkový displej, pod ním jsou tři signalizační diody. Zelená dioda vlevo signalizuje sepnutí hlavního vypínače na peci. Prostřední červená dioda signalizuje chybné zadání údaje nebo poruchu. Žlutá dioda vlevo indikuje sepnutí regulačního výstupu (topí-netopí). Ostatní prvky na panelu regulátoru jsou tlačítka membránové klávesnice a jejich význam je na první pohled patrný. Tlačítka na regulátoru jsou rozlišena barvou. Zelenomodrá tlačítka slouží k zadávání hodnot, kdežto červená tlačítka jsou ovládací. Dvě tlačítka jsou kombinovaná.



Obr. 4.4 Panel pro ovládání pece

Regulátor umožňuje vytvořit teplotní program až o dvaceti úsecích, přičemž úsekem rozumíme časovou vzdálenost mezi dvěma teplotami, ať už jde o vzrůst teploty, pokles nebo výdrž. Představme si, že potřebujeme, aby teplotní průběh v peci byl následující. Nárůst teploty na 250°C za 30 minut, zde 45 minut udržení teploty 250°C a poté z teploty 250°C na teplotu 560°C za 60 minut, z teploty 560°C na teplotu 980°C za 36 minut, zde výdrž 45 minut udržení teploty 980°C a ukončit program. Dále chceme, aby po dosažení poslední teploty, to znamená na začátku posledního úseku signalizovala pec akusticky tuto skutečnost. Graficky si tento průběh můžeme znázornit podle obr. 4.5



Obr. 4.5 Grafický průběh teploty pece

Na svislou osu jsme vynesli teplotu ve stupních, na vodorovnou osu jsme vynesli čas v minutách. V těchto jednotkách se tyto veličiny zadávají.

Na obrázku si všimněme, že tam, kde je výdrž, zopakujeme velikost teploty, na které chceme setrvat (250°C). V případě výpadku el. energie si musíme uvědomit důležitou věc a to, že teplota během výpadku el. energie v peci vždy poklesne, a že regulace bude vždy pokračovat od teploty, při které dojde k obnovení dodávky el. energie. Po zadání "POKRACUJ" pokračuje program v čase. To znamená, že probíhal-li program např. 1,5 hod. a nastal výpadek sítě, potom po zadání "POKRACUJ" regulátor co nejrychleji najíždí na teplotu ve třetím úseku a po najetí na tuto teplotu pokračuje podle zadaného programu. Regulace tedy pokračuje ve třetím úseku viz. *obr. 4.5*.

Zadáme-li však "NOVY PRUBEH", začíná program probíhat od teploty, která je v peci. V našem případě by při výpadku sítě po jedné hodině poklesla teplota v peci pod 250 °C a po zadání "NOVY PRUBEH" by regulátor navázal na teplotu v peci v prvním úseku teplotního programu viz. *obr. 4.5*. Nyní zadáme tento průběh do regulátoru a tím vytvoříme teplotní program.

## 4.2. Měřicí karta

Měřicí karta PCA-7228AS patří do kategorie multifunkčních PCI karet pro všeobecné použití nabízející všechny obvyklé I/O funkce. Všechny její funkce jsou implementované v aplikačním driveru TEDIA\_DAQ01. Pro programování této karty byl použit překládač Microsoft Visual Basic.



*Obr. 4.6 Měřicí karta PCA-7228AS*

Karta obsahuje osm analogových vstupů (s možností rozšíření na 32 pomocí externího multiplexeru) alternativně s 12bitovým nebo 14bitovým A/D převodníkem. Vstupy využívají zapojení typu S.E. s jedním společným signálem spojeným s kostrou počítače, v případě potřeby izolace analogových vstupů je dodávána řada izolačních zesilovačů, popř. lze využít analogické karty řady PCA-7228EL/7428EL nabízející izolované analogové vstupy.

Analogové vstupy doplňují dva analogové výstupy s 12bitovými D/A převodníky (pouze verze AS), dva čítače, osm digitálních vstupů a osm digitálních výstupů.

Signály analogových vstupů a výstupů jsou vyvedeny na konektor D-Sub 25, signály čítačů pak na konektor D-Sub 9, oba konektory jsou umístěny přímo na PC štítku karty. Signály digitálních portů jsou vyvedeny na konektorech umístěných na zadní straně karty a mohou být zpřístupněny redukcí s PC štítkem (není součástí dodávky).

Karty řady PCA-7228A/7428A využívají pro I/O signály rozhraní unifikovaná pro všechny DAQ PC karty TEDIA a je tak pro ně dostupná řada dceřiných desek izolovaných vstupů, výkonových výstupů, izolačních zesilovačů a multiplexerů.

Tab. 4.2 Přehled parametrů karty PCA-7228AS

počet analogových vstupů	8 S.E. (samostatná PC karta) 32 při použití externího multiplexeru OPT-832
počet vstupních rozsahů	6
rozlišení A/D převodníku	12 bitů
rozlišení D/A převodníků	12 bitů
maximální vzorkovací frekvence	100 kHz
spouštění vzorkování	softwarově, časovačem, externím TTL signálem
datový zásobník	64kB (dvoubránová RAM)
počet analogových výstupů	2
počet čítačů	2
vstupní frekvence čítačů	max. 2 MHz
počet digitálních portů	jeden 8bitový vstupní port
odolnost proti přepětí	$\pm 24V$ trvale, $\pm 50V$ / 10ms max.
vstupní rozsahy	$\pm 10V$ , $\pm 5V$ , $\pm 2,5V$ , $\pm 1,25V$ , $\pm 0,635V$ , $\pm 0,3125V$
výstupní rozsahy	$0 \div 5V$ , $\pm 5V$
doba ustálení výstupního napětí	0,005ms typ
počet a typ čítačů	2x 16 bitů
vstupní frekvence čítačů	2MHz max.
pracovní úrovně čítačů	TTL/HC (odolnost $\pm 24V$ )
pracovní úrovně digitálních vstupů	TTL/HC (odolnost $\pm 24V$ )
pracovní úrovně digitálních výstupů	TTL/HC
sběrnice	standardní PCI (32 bitů, 33 MHz, 5V)
I/O + MEM adresa, kanály přerušení	přiděluje PnP PCI BIOS
rozměry desky	cca 100x130 mm
Poznámka: Čítače jsou synchronně skenovány spolu s analogovými vstupy.	

#### 4.2.1. Funkce měřicí karty PCA-7228AS použité v programu "PEC"

##### Td\_Config\_Acquisition

**Prototyp:** *Td\_Config\_Acquisition(PHandle\_ handle, DWORD parameter0, DWORD parameter1, DWORD index\_of\_channel, DWORD number\_of\_channels)*

**Popis:** Funkce je určena pro konfiguraci kanálu v měřicí sekvenci; jejím opakovaným voláním je nutné vyplnit kontinuální pole kanálu od 0 do N-1 (N je počet měřených kanálů).

**Upozornění:** Konfiguraci je nutné provést před každým voláním Td\_Start\_Acquisition.

**Podpora:** Implementováno pro zařízení s blokovým přenosem dat.

**Argumenty:**

**handle** - Handle otevřeného zařízení.

**parameter0** - Tato položka určuje jaká data se budou vracet v měřicí sekvenci na pozici kanálu.

**0..255:** Kanál zpřístupňuje analogové vstupy a zadaná hodnota definuje nastavení multiplexeru zařízení. Platné hodnoty jsou definovány možnostmi daného zařízení.

**256..511:** Kanál zpřístupňuje citace (SW buffer) nebo synchronně scanované citace (HW buffer). Platné hodnoty jsou definovány možnostmi daného zařízení.

**512..767:** Kanál zpřístupňuje digitální vstupní porty (SW buffer) nebo synchronně scanované digitální vstupní porty (HW buffer). Platné hodnoty jsou definovány možnostmi daného zařízení.

**768:** Kanál zpřístupňuje aktuální stav generátoru čárových značek. Platné hodnoty jsou definovány možnostmi daného zařízení.

**parameter1** - Význam tohoto parametru je závislý na obsahu *parameter0*; platné hodnoty jsou definovány možnostmi daného zařízení.

**index\_of\_channel** - Číslo programovaného kanálu, tzn. 0, 1, ..., N-1 (číslováno od nuly).

**number\_of\_channels** - Počet měřených kanálů, tzn. N (číslováno od jedničky výše).

### **Td\_Config\_Buffer\_Timing**

**Prototyp:** *Td\_Config\_Buffer\_Timing(PHandle\_handle, double\* frequency, double\* period)*

#### **Popis:**

- 1) Při blokovém měření spouštěným časovačem nastaví periodu mezi odměřováním měřicích sekvencí.
- 2) Při blokovém měření spouštěným externím vstupem nastaví optimální parametry měřicího zařízení podle nejvyšší předpokládané frekvence.
- 3) Při blokovém měření spouštěným generátorem čárových značek nastavuje frekvenci generování pulzu a povoluje přerušení od generátoru čárových značek (kombinace funkcí *Td\_Config\_Ability\_Generate\_IRQ* a *Td\_Config\_IRQTimer*). Hodnota je předána prostřednictvím frekvence nebo čárovým úsekem mezi sekvencemi.

**Podpora:** Implementováno pro zařízení s blokovým přenosem dat.

#### **Argumenty:**

**handle** - Handle otevřeného zařízení.

**frequency** - Ukazatel na oblast paměti, do které je uložena hodnota "frekvence měření" [Hz].

**period** - Ukazatel na oblast paměti, do které je uložena hodnota "čas mezi měřeními" [s]

**poznámka:** Z parametru *frequency* a *period* musí být jeden 0 a druhý větší než 0. Vzájemný vztah parametru je definován jako -  $period = 1/frequency$ . Voláním funkce je do obou parametru uložena skutečně nastavená hodnota (nejbližší možná požadované hodnotě). Platné hodnoty jsou definovány možnostmi daného zařízení.

### **Td\_Close\_Driver**

**Prototyp:** *Td\_Close\_Driver(PHandle\_handle)*

**Popis:** Zastaví veškerou činnost zařízení a ukončí se zařízením spojení.

**Podpora:** Implementováno pro všechna zařízení.

#### **Argumenty:**

**handle** - Handle otevřeného zařízení.



## **Td\_Get\_Buffer\_Data**

**Prototyp:** *Td\_Get\_Buffer\_Data(PHandle\_ handle, DWORD\* buffer, DWORD size\_of\_buffer, DWORD\* recorded\_row)*

**Popis:** Přečte maximální možný počet měřicích sekvencí z bufferu odměřených dat.

**Podpora:** Implementováno pro zařízení s blokovým přenosem dat.

### **Argumenty:**

*handle* - Handle otevřeného zařízení.

*buffer* - Ukazatel na oblast paměti, do které funkce uloží naměřené kanály z jedné či více měřicích sekvencí (aplikace musí předat ukazatel na místo v paměti velké minimálně *size\_of\_buffer\*size of (DWORD)*).

*size\_of\_buffer* - Počet kanálu, které se do bufferu mohou uložit.

*recorded\_row* - Ukazatel na oblast paměti, do které funkce uloží informace o počtu zaznamenaných vstupních kanálu (jedna sekvence jich obsahuje několik).

## **Td\_Get\_DeviceName**

**Prototyp:** *Td\_Get\_DeviceName(char\* name, DWORD index\_of\_device)*

**Popis:** Získá jméno zařízení specifikované indexem v rozsahu  $<0-(number\_of\_devices-1)>$  ze seznamu jmen v administračním programu. Konstantu *number\_of\_devices* lze zjistit funkcí *Td\_Get\_Number\_Of\_Devices*.

**Podpora:** Funkce nezávislá na zařízení.

### **Argumenty:**

*name* - Ukazatel na uživatelem alokované místo v paměti (alokovat je třeba pole minimálně 100 znaku), do kterého funkce vyplní jméno zařízení specifikovaného indexem.

*index\_of\_device* - Index do pole jmen.

## **Td\_Init\_Driver**

**Prototyp:** *Td\_Init\_Driver(PHandle\_ \* handle, char\* name)*

**Popis:** Zpřístupní zařízení zadané jménem (jméno je možné získat funkcí *Td\_Get\_DeviceName*, nebo administračním programem).

**Podpora:** Implementováno pro všechna zařízení.

### **Argumenty:**

*handle* - Handle otevřeného zařízení.

*name* - Jméno zařízení uložené v poli ukončeném znakem c++:\0 Pascal: Chr(0), maximálně 19 znaku dlouhým.

## **Td\_Start\_Acquisition**

**Prototyp:** *Td\_Start\_Acquisition(PHandle\_ handle, DWORD mode)*

**Popis:** Odstartuje blokové měření podle parametru, po této funkci by měla následovat skupina funkcí pro odebírání dat.

**Podpora:** Implementováno pro zařízení s blokovým přenosem dat.

### **Argumenty:**

*handle* - Handle otevřeného zařízení.

*mode* - Režim, ve kterém zařízení bude pracovat:

1: zařízení pracuje se softwarovým spouštěním

- 2: zařízení pracuje se spouštěním časovačem  
 3: zařízení pracuje se spouštěním externím signálem  
**poznámka:** Dáno možnostmi daného zařízení.

#### Td\_Stop\_Acquisition

**Prototyp:** *Td\_Stop\_Acquisition(PHandle\_ handle)*

**Popis:** Ukončí měření spuštěné Td\_Start\_Acquisition.

**Podpora:** Implementováno pro zařízení s blokovým přenosem dat.

**Argumenty:**

**handle** - Handle otevřeného zařízení.

### 4.3. Měření teploty

Měření teplot v měřicím řetězci zajišťovaly dva plášťové termočlánky NiCr-Ni (typ K), které mají rozsah teplot od -200 do 1250 °C a citlivost 40,8  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .



Napětí z těchto termočlánků dále zpracovával univerzální měřicí přístroj ALMEMO® 2390-3. Jedná se o kombinovaný univerzální ruční měřicí přístroj, který je vybaven patentovaným inteligentním ALMEMO® konektorem. Tento konektor nabízí připojení velkému množství různých senzorů pro měření fyzikálních, elektrických a chemických veličin.

Obr. 4.7 Univerzální měřicí přístroj ALMEMO® 2390-3

Tab. 4.3 Technické údaje měřicího přístroje ALMEMO® 2390-3

počet kanálů	4 funkční kanály (měření a funkce kanálů, v závislosti na typu senzoru)
měřicí vstupy	dva ALMEMO® konektory pro senzory ALMEMO®
rychlost měření	2,5 měřicích operací za sekundu
kontinuální přesnost systému	$\pm 0,05\%$ z měřené hodnoty $\pm 2$ digity
teplotní drift	0,01% /K
kompenzace studeného konce	$\pm 0,2 \text{ K} \pm 0,01 \text{ K} / ^\circ\text{C}$ (-30 až +80 °C)
výstupy	1 ALMEMO® konektor pro analogový výstupní modul nebo kabel rozhraní
displej	6,5 místný, 7 segmentový, 2 místné, 16 segmentový, 12 mm
A / D převodník	delta-sigma $\pm 15/16$ bit 2,5 měřicích operací za sekundu
mikroprocesor	NEC 78F0078
napájení	7 až 13 V DC, bez galvanického oddělení

## 4.4. Volba programovacího jazyka

Měřicí karta PCA-7228AS podporuje programovací jazyky Delphi, C, C++ a Visual Basic. Pro vytvoření softwaru monitorování chodu laboratorní pece jsem zvolil programovací jazyk Visual Basic 6.0 pro jeho jednoduchost a uživatelsky přívětivé rozhraní.

Visual Basic (zkratka VB) je v informatice označován jako událostmi řízený programovací jazyk. Software usnadňující práci s tímto jazykem je označován jako integrované vývojové prostředí (IDE) vyvinuté společností Microsoft využívající programovací model COM. Visual Basic je odvozen od programovacího jazyka BASIC a umožňuje rychlý vývoj aplikací (RAD) s grafickým uživatelským rozhraním (GUI), přístup k databázím prostřednictvím DAO, práci se vzdálenými objekty (Remote Data Objects) nebo objekty ActiveX, jejich tvorbu a správu. Skriptovací jazyky jako jsou VBA a VBScript, jsou syntakticky podobné Visual Basicu, ale výkonem rozdílné.

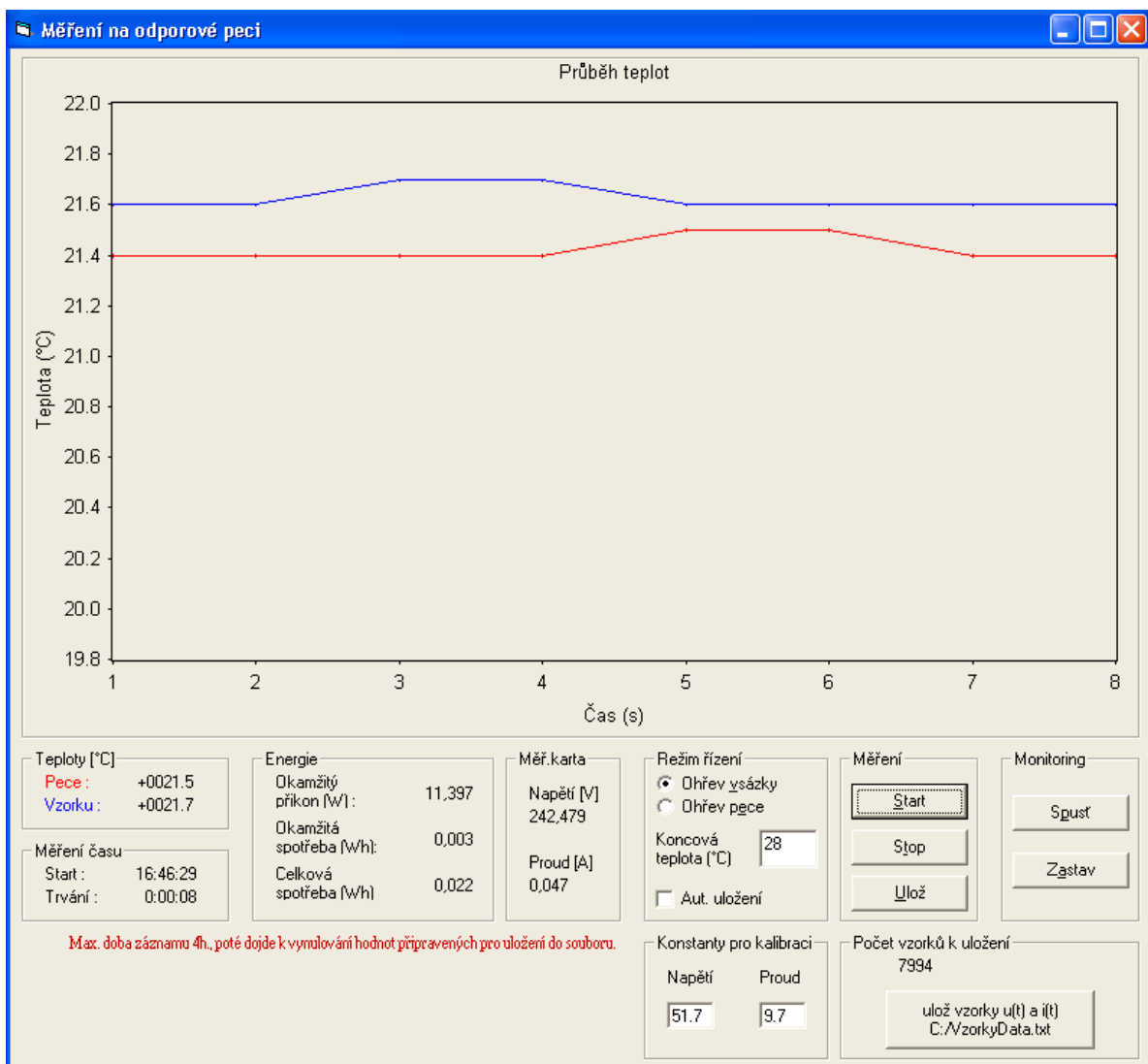
Program napsaný ve Visual Basicu může tedy používat Windows API, ale je zapotřebí deklarovat externí funkci. Poslední vydání Visual Basicu byla verze 6.0, která byla vydána v roce 1998. Podpora Microsoftu skončila v březnu roku 2008 a následníkem byl Visual Basic .NET.

Visual Basic byl navržen tak, aby bylo jednoduché se ho naučit a používat. Jazyk je vhodný nejen pro programátory, kteří vytvářejí jednoduché GUI aplikace, ale umožňuje vytvářet i komplexní aplikace

Programování ve Visual Basicu je počítáno mezi objektově orientované a událostmi řízené techniky. Programátor může používat velké množství předdefinovaných objektů, jako jsou formuláře, textová pole pro zadávání a zobrazování dat, příkazová tlačítka, menu, popisky a velké množství dalších objektů. Souhrnně tyto objekty nazýváme ovládacími prvky (controls). Každý ovládací prvek má definovány své vlastnosti, metody a události. Vlastnostmi prvku (properties) jsou přesně v souladu s názvem vlastnosti daného ovládacího prvku. Tyto vlastnosti udávají vzhled a chování ovládacího prvku v aplikaci. U textového pole lze například definovat font, kterým bude v poli zobrazen text, velikost pole a jeho umístění na formuláři, název, pomocí něhož se na ovládací prvek bude odkazovat programový kód a mnoho dalších vlastností.

### 4.4.1. Vývojové prostředí

Vývojové prostředí Visual Basicu obsahuje panel s ovládacími prvky (toolbox), které se přenášejí technikou drag-and-drop na formulář. Ovládací prvky mají přiřazeny atributy a správce událostí (event handler). Výchozí hodnoty jsou poskytovány ve chvíli, kdy je ovládací prvek vytvořen, ale jeho hodnoty mohou být změněny i programátorem. Mnoho hodnot atributů může být modifikováno i za běhu programu na základě uživatelských akcí nebo změně prostředí, vyvolaných dynamickou aplikací. Například můžeme vložit kód do "event handleru" pro změnu velikosti formuláře, aby ovládací prvek zůstal ve formuláři vycentrovaný nebo vložením kódu do "event handleru" pro stisknutou klávesu v textovém poli (textbox) program automaticky překládá text, který byl vložen.



Obr. 4.8 Formulář vývojového prostředí Visual Basic – program "PEC"

Visual Basic může vytvářet spustitelné soubory EXE, ovládací prvky ActiveX, nebo dynamické knihovny (\*.dll), ale primárně je používán k vývoji Windows aplikací a k rozhraní databázových systémů. Dialogová okna s menší funkcionalitou mohou být použita jako pop-up okna. Ovládací prvky poskytují základní funkcionalitu aplikace, přičemž programátor může vkládat další logiku v příslušných "event handlerech". Například rozbalení "comboboxu" (drop-down) automaticky zobrazí jeho list a umožňuje uživateli vybrat položku listu. "Event handler" je volán ve chvíli, kdy je položka označena a ten potom může spustit kód vytvořený programátorem, který vykoná nějakou akci založenou na vybrané položce.

Komponenta Visual Basicu nemusí obsahovat uživatelské rozhraní, místo toho může poskytovat objekty ActiveX dalším programům přes Component Object Model (COM). To umožňuje serverové zpracování nebo přidávání modulů.

## 5. Koncepce a popis programu

Vzhledem k složitosti programu jsem před samotným programováním vytvořil strukturu programu ve formě diagramu. Viz *obr. 5.1, 5.2, 5.3*

Program "PEC" se skládá ze dvou částí. První část tvoří tzv. "MONITORING", tato část se aktivuje při stisknutí tlačítka "SPUSTĚ" v sekci "MONITORING". Při stisknutí tohoto tlačítka dojde ke spuštění procesu, který zahrnuje aktivaci měřicí karty a otevření sériového portu. Přes sériový port komunikuje měřič teploty *ALMEMO® 2390-3* s počítačem. Tímto způsobem získává program "PEC" informace o teplotě pece a vsázky.

Součástí aktivace měřicí karty je nastavení měřicích podmínek karty. Jako první dojde k nastavení počtu aktivních měřicích kanálů. V našem případě se jedná o dva měřicí kanály. První kanál je určen pro napětí, které je snímáno z výstupu měřicího transformátoru. Druhý kanál je určen pro proud, který je snímán přes klešťový ampérmetr. Proud na výstupu z ampérmetru je převedený pomocí odporového bočnicku na napětí. Zesílení obou kanálů je nastaveno na 1x.

Poté program nastaví vzorkovací frekvenci měřicí karty na 1000 Hz pro každý kanál, což nám zajistí kvalitní zpracování naměřených dat. Po těchto krocích dojde ke spuštění měřicí karty a program začne ukládat a zpracovávat data z měřicí karty a data o teplotě pece a vsázky získané přes sériový port z měřiče teploty *ALMEMO® 2390-3*. Snímání teplot probíhá v intervalu dvou sekund, tyto teploty jsou zobrazovány v hlavním okně programu "PEC".

Zpracování vzorků napětí a proudu naměřených měřicí kartou dochází periodicky v intervalu jedné sekundy. Z těchto vzorků program vypočítává efektivní hodnotu napětí a proudu. Dále je proveden výpočet okamžitého příkonu pece, okamžité el. energie. Všechny výše zmíněné vypočtené hodnoty jsou kontinuálně zobrazovány v hlavním okně programu "PEC".

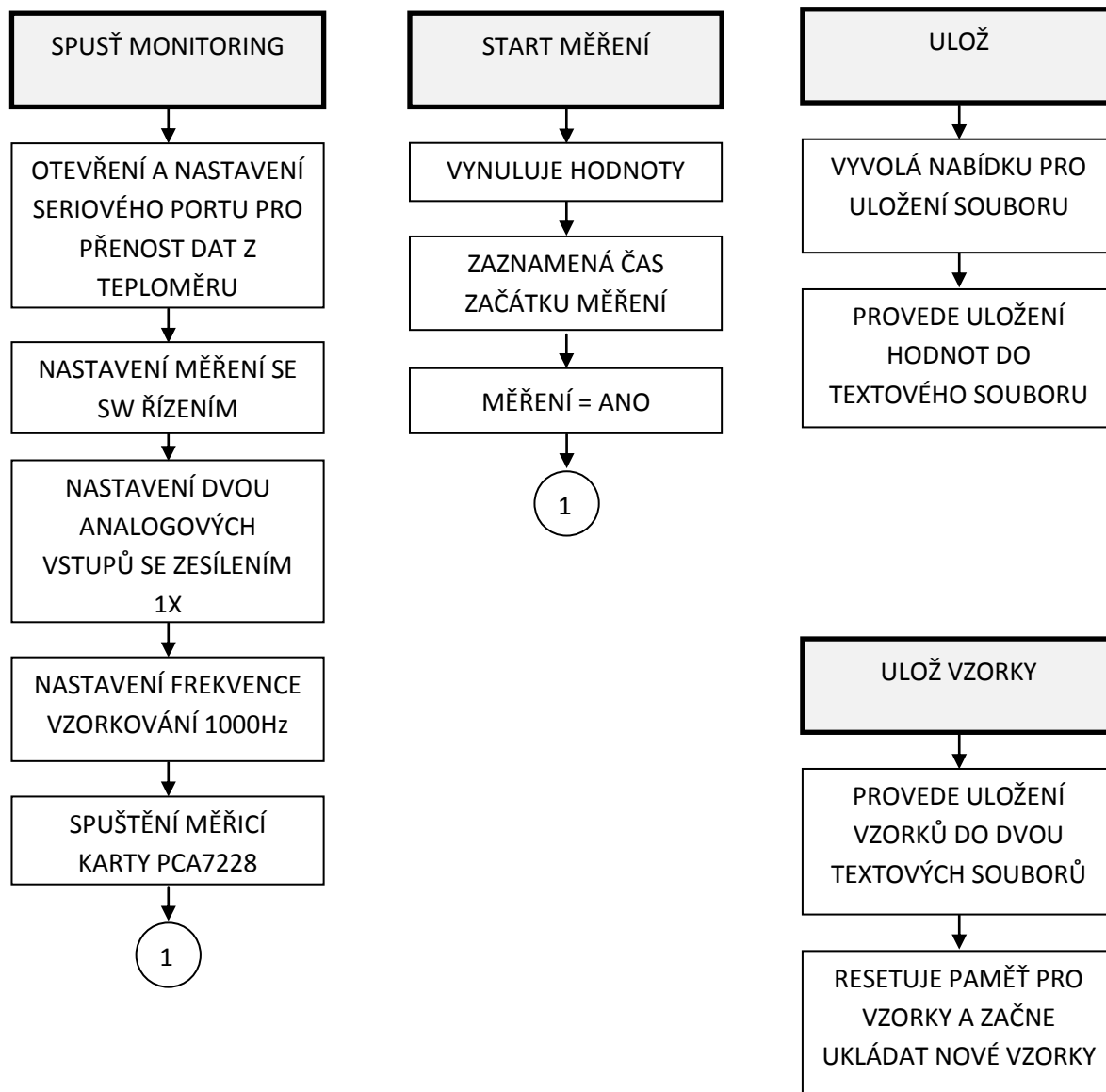
Druhá část programu je "MĚŘENÍ", které se aktivuje tlačítkem "START" v sekci "MĚŘENÍ". Po stisknutí tohoto tlačítka dojde k uložení aktuálního času, ke kterému je zahájeno měření. A dále jsou všechny naměřené a vypočtené hodnoty ukládány v intervalu jedné sekundy do paměti počítače, včetně časových hodnot. Všechny hodnoty jsou zobrazovány jako při režimu "MONITORING" a navíc je aktivován graf, kde jsou zobrazovány průběhy teplot pece a vsázky. Po spuštění "MĚŘENÍ" začne program navíc počítat a zobrazovat hodnotu celkové spotřebované el. energie za časový úsek od spuštění měření. Výpočet el. energie je prováděn z jednotlivých hodnot vzorků napětí a proudu. Časový odstup mezi jednotlivými vzorky na každém kanálu je jedna milisekunda. Vypočtená hodnota el. energie z těchto časových úseků a následná suma těchto hodnot nám zaručuje naprostou přesnost zobrazovaných hodnot.

Dále je zde možnost automaticky ukončit měření po překročení nastavené teploty pece nebo vsázky. Maximální teplota vsázky nebo pece, při které se má ukončit měření se nastavuje v sekci "REŽIM ŘÍZENÍ".

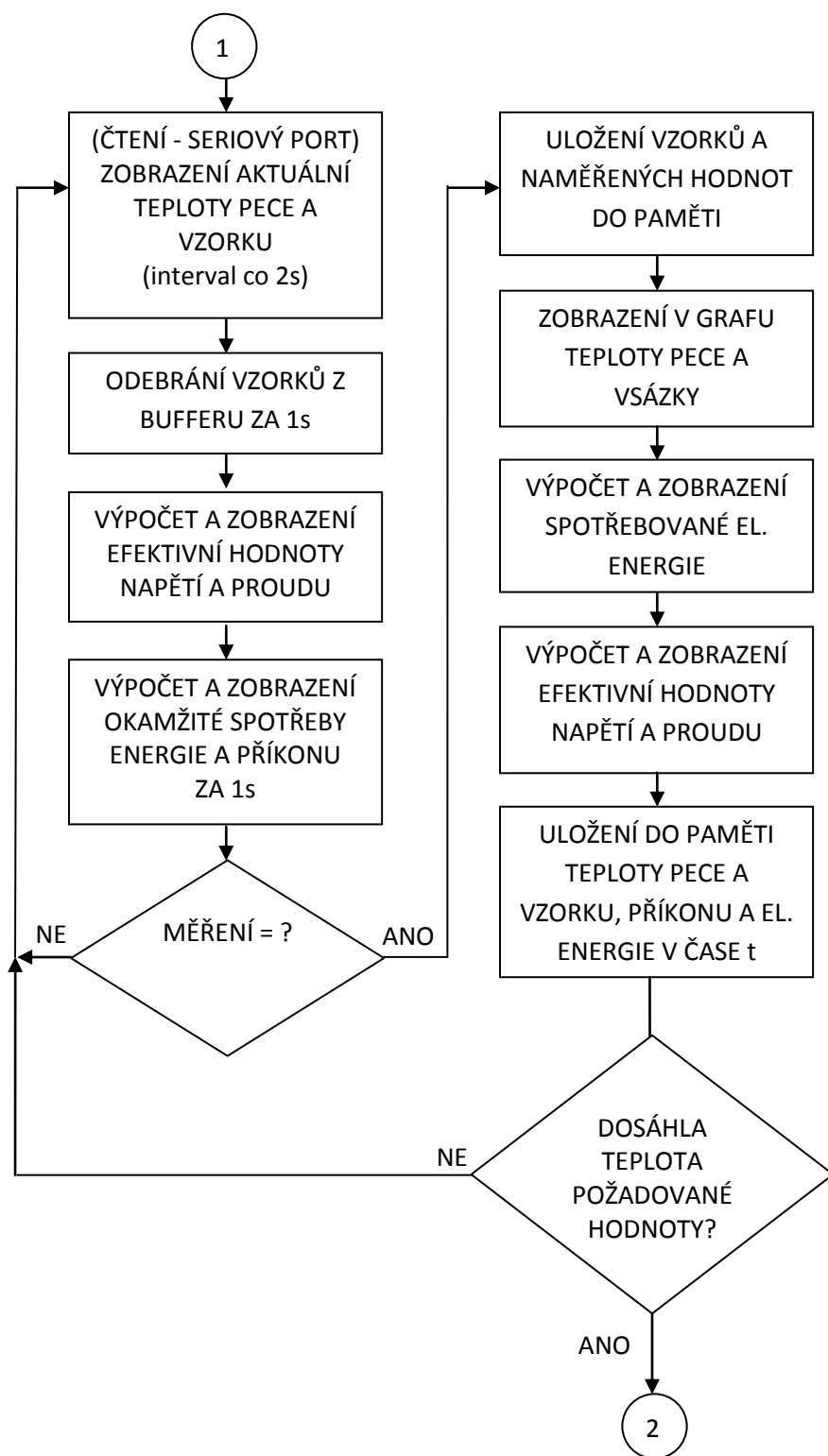
Pokud chceme, aby byly naměřené hodnoty automaticky uloženy, tak musíme zaškrtnout políčko "AUT. ULOŽENÍ" v sekci "REŽIM ŘÍZENÍ". V případě, že dojde k ukončení měření, program automaticky uloží naměřené hodnoty do souboru, který jste si vybrali při aktivaci automatického uložení.

Program nám umožňuje i ukládání jednotlivých vzorků napětí a proudu, které se uloží do dvou textových souborů, zvláště pro napětí a pro proud. Místo uložení těchto souborů je vždy na jednotce C:/. Vzorky jsou ukládány do souborů po sloupcích a odděleny znakem ";", to zaručuje snadné převedení dat do Excelu a následné zobrazení v grafu. Celková kapacita záznamu uložených vzorků a provozních hodnot jsou 4 hodiny, poté je paměť resetována. Uložení hodnot monitorujících chod pece se provádí buď automaticky po ukončení měření v případě, že je zaškrtnuté políčko "AUT. ULOŽENÍ" v sekci "REŽIM ŘÍZENÍ". Pokud toto políčko není zaškrtnuté, dojde k uložení hodnot až

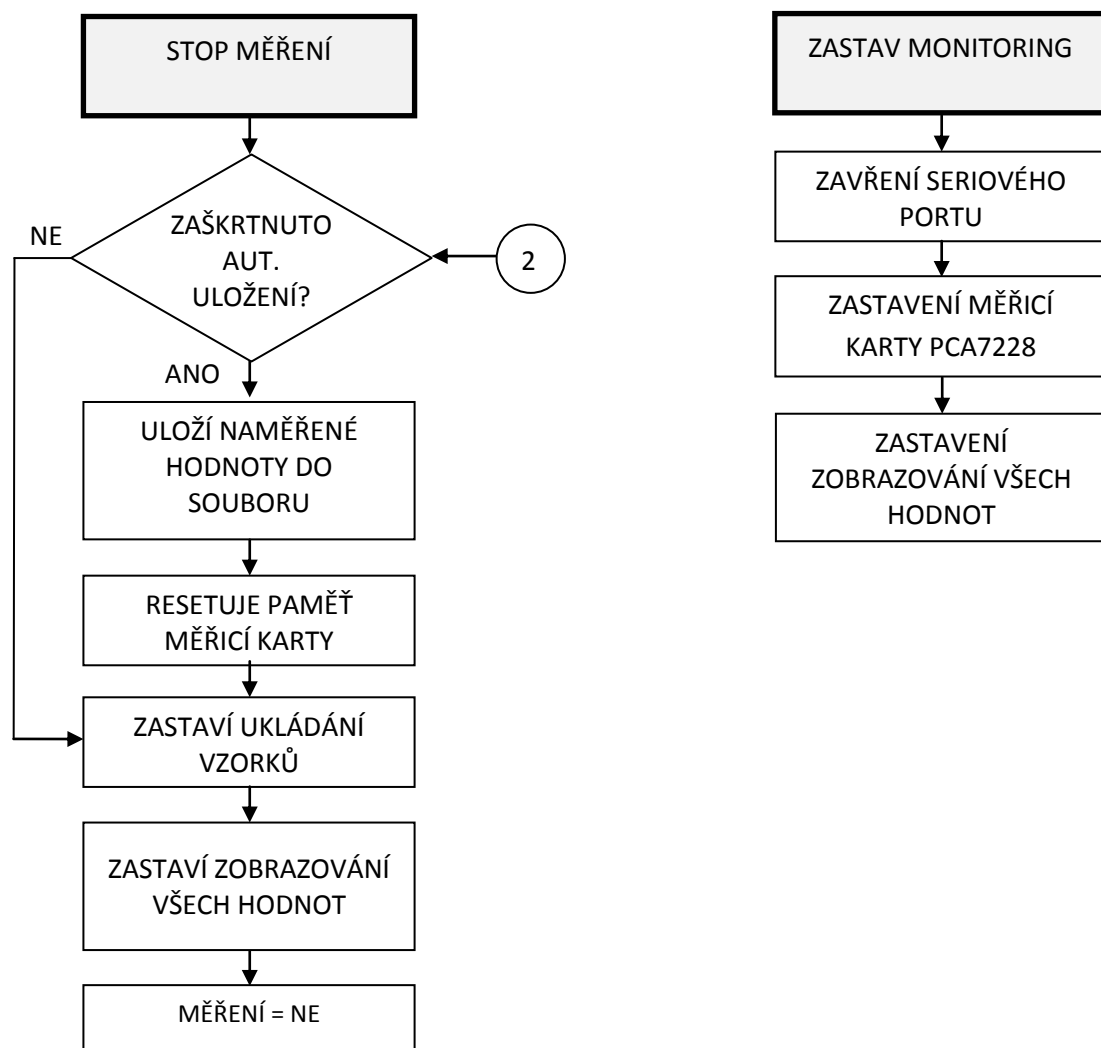
po stisknutí tlačítka "ULOŽ", zde dojde k zobrazení nabídky pro uložení souboru. Po vybrání místa a jména souboru program uloží naměřené hodnoty do textového souboru.



Obr. 5.1 Vývojový diagram programu "PEC" část 1.



Obr. 5.2 Vývojový diagram programu "PEC" část 2.



Obr. 5.3 Vývojový diagram programu "PEC" část 3.



## 5.1. Efektivní hodnota

V příští kapitole se budeme zabývat problematikou měření el. energie při pulzní regulaci, kde klíčovým prvkem je měření efektivní hodnoty proudu, proto si připomeneme co je efektivní hodnota.

Efektivní hodnota (RMS – Root Mean Square) je hodnota, která odpovídá stejnosměrnému proudu, který by vyvinul stejné množství tepla  $Q$  při průchodu odporovou zátěží. Množství tepla, vyvinutého stejnosměrným proudem  $I$ , při průchodu odporem  $R$  za dobu  $T$ :

$$Q = R \cdot I^2 \cdot T \quad (5.1)$$

Okamžitý výkon střídavého proudu

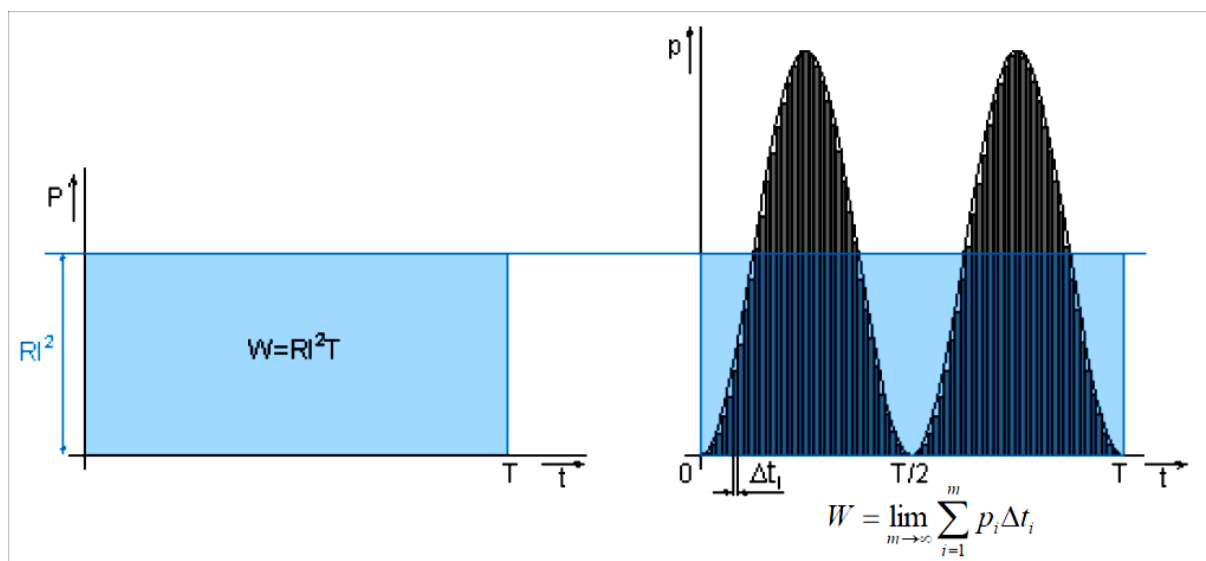
$$p = R \cdot i^2(t) \quad (5.2)$$

Celkové množství tepla, vyvinuté střídavým proudem za dobu  $T$ , vypočítáme jako „součet“ okamžitých výkonů – tedy integrací

$$Q = \int_0^T R \cdot i^2(t) \quad (5.3)$$

A po dosazení bude

$$R \cdot I^2 \cdot T = \int_0^T R \cdot i^2(t) \Rightarrow I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)} \quad (5.4)$$



Obr. 5.4 Efektivní hodnota znázorněna obrazně, kdy stejnosměrný proud  $I$  vyvine stejné teplo jako proud proměnný

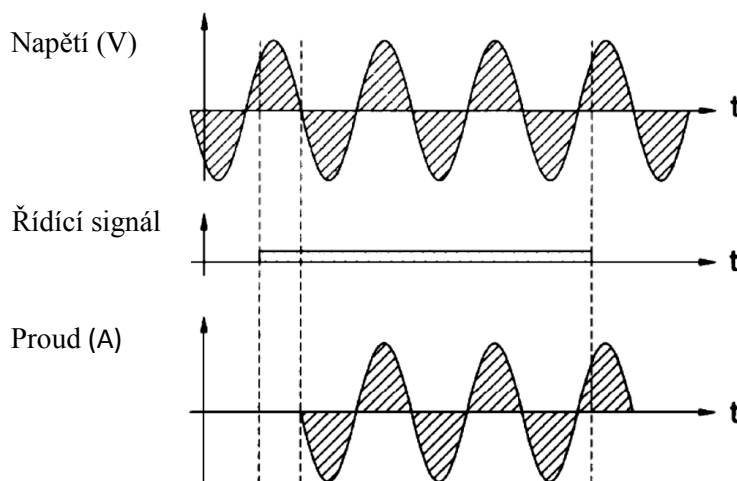
Jelikož měřicí karta PCA-7228AS pracuje v diskrétní oblasti, tak pro výpočet efektivní hodnoty napětí a proudu v programu "PEC", byl použit upravený vzorec pro výpočet efektivní hodnoty, kde  $n$  je počet vzorků, což je v tomto případě 1000 vzorků.

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{\int_0^T u^2(t) dt}{T}} \Rightarrow \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u^2(i)}{n}} \quad (5.5)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{\int_0^T i^2(t) dt}{T}} \Rightarrow \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n i^2(i)}{n}} \quad (5.6)$$

## 5.2. Pulzní regulace

Pec MP05-01 reguluje teplotu pomocí systému pulzní regulace. Tento systém používá jednoduchou řídicí logiku, která bývá galvanicky (opticky) oddělená od výkonové části. Řídicí signály bývají přizpůsobeny TTL logice (5V), takže je možné tyto moduly ovládat přímo z výstupu počítačů. Jako výkonový spínací prvek je použit triak. Jeho hlavní výhodou je, že dokáže uskutečnit vypínací a zapínací děje v rozsahu několika  $\mu s$ . To nám umožňuje řízené spínání zátěže při průchodu proudu nulou. Hlavním principem pulzního řízení je propouštění pouze zvoleného počtu sinusovek, ve zvoleném časovém úseku. Jelikož se řídicí prvek spíná v okamžiku, kdy ještě nevede proud, nevzniká při této regulaci rušení. Z principu této regulace vyplývá, že ji lze použít výhradně k řízení zátěží s velkou setrvačností (tepelné spotřebiče). Průběhy veličin jsou naznačeny na následujícím obrázku, jestliže je přítomen řídicí signál a prochází-li síťové napětí nulou triak sepne.



Obr. 5.5 Spínání proudu při průchodu nulou pomocí triaku

## 6. Měření el. energie u zařízení s pulzní regulací

Při tvorbě programu jsem narazil na problém, který byl v tomto případě zásadní. Jednalo se o měření spotřebované el. energie.

Na začátku tvorby programu jsem použil známý vzorec (6.1) pro výpočet spotřebované el. energie, který vychází z výkonu vypočítaného z efektivních hodnot napětí a proudu. Efektivní hodnoty byly vypočítávány po časových úsecích trvající jednu sekundu.

$$E = P \cdot t = U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot t [Wh] \quad (6.1)$$

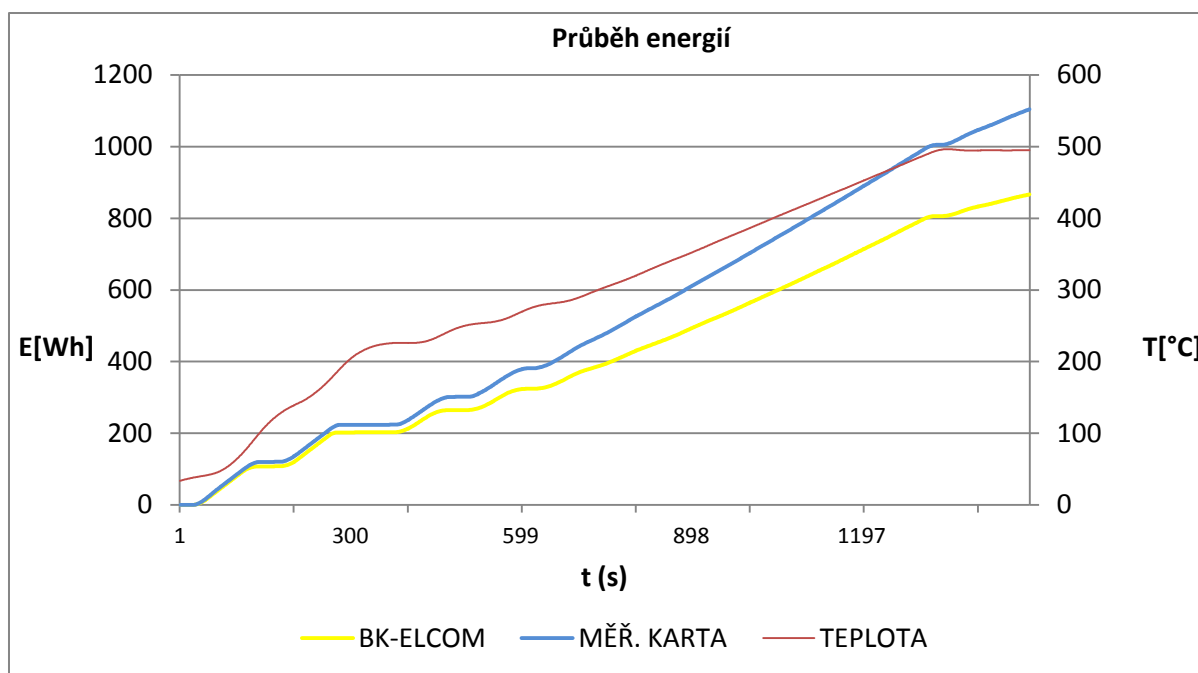
Abych ověřil, zda hodnoty el. energie při pulzní regulaci vypočítané programem jsou správné, použil jsem k porovnání referenční přístroj pro měření el. energie. Jednalo se o Analyzátor sítí BK-ELCOM v provedení ENA500.12. Je to komplexní modulární systém pro monitoring a analýzu kvality elektřiny v souladu s platnými mezinárodními normami a dalšími závaznými dokumenty platnými v České republice.



Obr. 6.1 Analyzátor BK-ELCOM v provedení ENA500.12

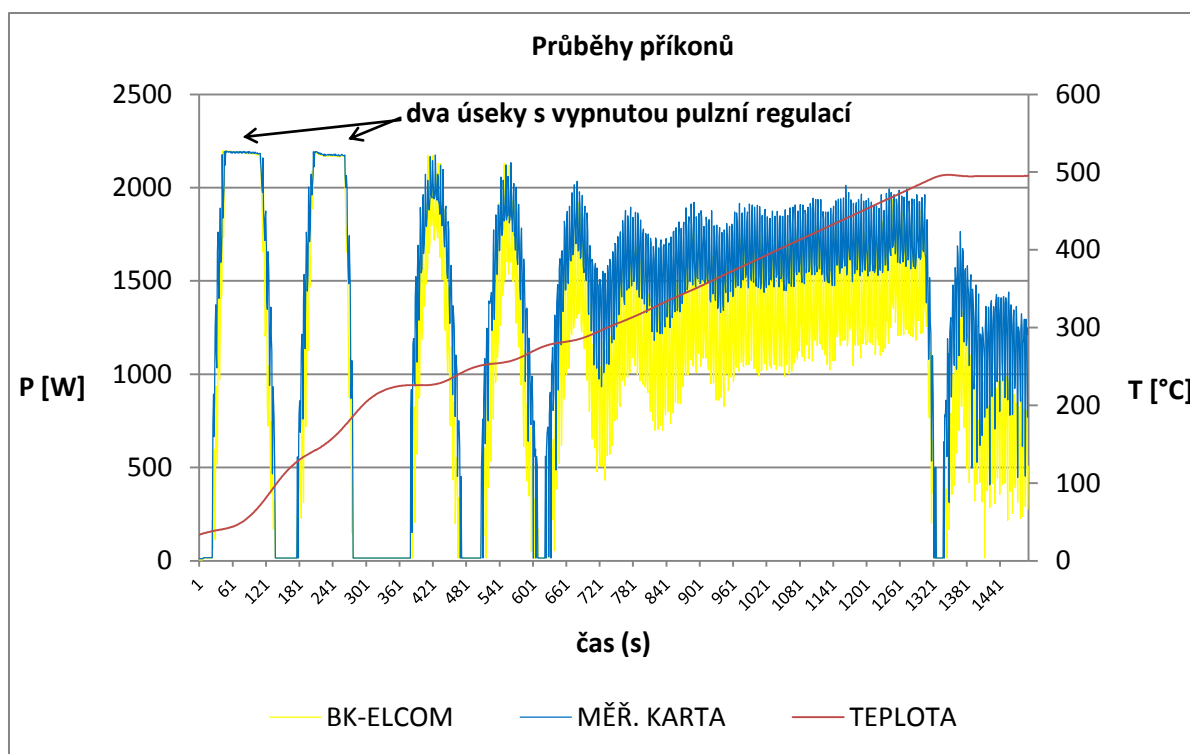
### 6.1. Měření č. 1

Do výše zmíněného měřicího řetězce (pec, měřicí karta a měřič teplot) jsem přidal ještě již zmíněné referenční měřidlo BK-ELCOM. Měření spotřeby el. energie pece bylo zahájeno oběma přístroji současně ve stejný čas. Měření probíhalo při nahřívání pece ze studeného stavu až po nahřátí na teplotu 500°C. Z počátku měření byla pulzní regulace pece vypnuta ve dvou časových úsecích. Doba měření trvala 25 minut. Vypočtena el. energie z hodnot měřicí karty a naměřené hodnoty z BK-ELCOM byly uloženy do souborů a následně převedeny do programu EXCEL, kde byl z těchto hodnot sestaven graf, který znázorňuje průběh hodnot el. energie vypočtené z hodnot měřicí karty a z BK-ELCOM viz. obr. 6.2. Jak je vidět na obr. 6.2, tak po 25 minutách vznikl viditelný rozdíl mezi el. energií vypočtenou z hodnot měřicí karty a el. energií vypočtenou referenčním měřidlem. Tento rozdíl činil po 25 minutách provozu pece 238 Wh.



Obr. 6.2 Průběh spotřebované el. energie měřené referenčním měřidlem a měřicí kartou

Chyba měření mezi normálním průběhem proudu a pulzním průběhem je lépe vidět na obr. 6.3, kde jsou znázorněny průběhy okamžitých příkonu. V první fázi nahřívání pece se nachází již zmíněné dva časové úseky, kde byla pulzní regulace pece vypnutá. V těchto úsecích je chyba měření skoro nulová. Při přechodu na pulzní regulaci dochází k odchylce hodnot příkonu vypočtené z měřicí karty od referenčních hodnot vypočtených BK\_ELCOM.

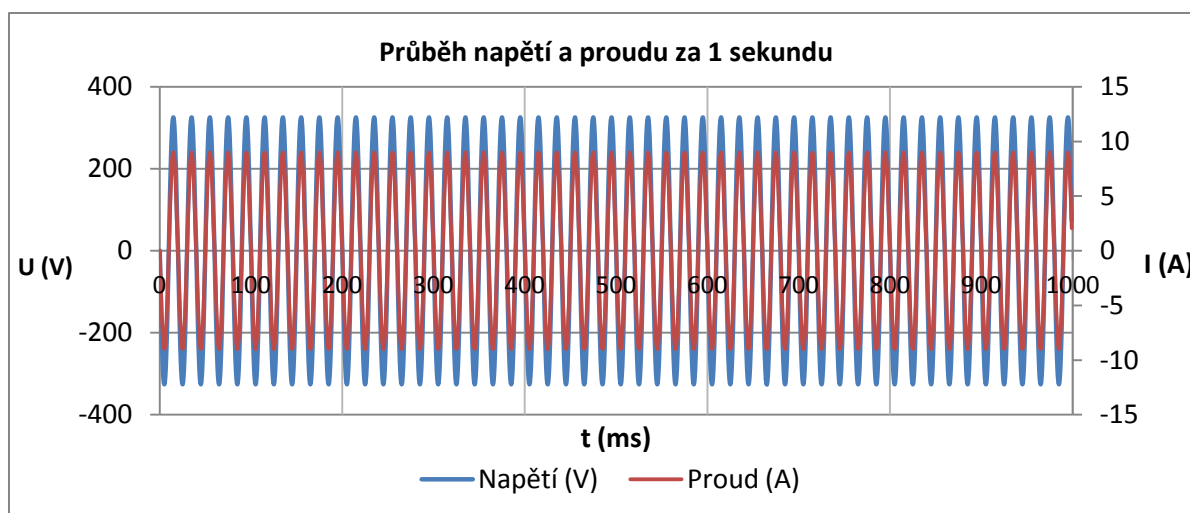


Obr. 6.3 Průběhy příkonu měřené referenčním měřidlem a měřicí kartou

Chyba měření 238 Wh za 25 minut provozu pece byla nepřijatelná, bylo nutno najít příčinu, která způsobuje takovou odchylku a poté opravit část programu zodpovědnou za výpočty. Pro nalezení příčiny chybného měření jsem využil následující simulace.

Budeme vycházet ze základní časové jednotky a to je jedna sekunda. Nasimulujeme si sinusový průběh napětí o hodnotě  $U_{max} = 326 \text{ V}$  a sinusový průběh proudu o hodnotě  $I_{max} = 9 \text{ A}$  s  $\cos \varphi = 1$  a frekvencí 50 Hz. Simulovat budeme celkem tři průběhy, z nichž každý bude trvat jednu sekundu. Aby byl vidět výsledek jasněji, tak tyto jedno sekundové časové úseky se budou neustále opakovat celou hodinu. Postupně spočítáme efektivní hodnotu z každého sinusového průběhu napětí a proudu za jednu sekundu a následně z těchto hodnot vypočítáme celkovou spotřebovanou el. energii za jednu hodinu provozu.

Průběh č. 1 bude simulovat nepřerušovaný hodinový průběh napětí a proudu. Na obr. 6.4 je znázorněna jedna sekunda tohoto průběhu.



Obr. 6.4 Průběh napětí a proudu č. 1

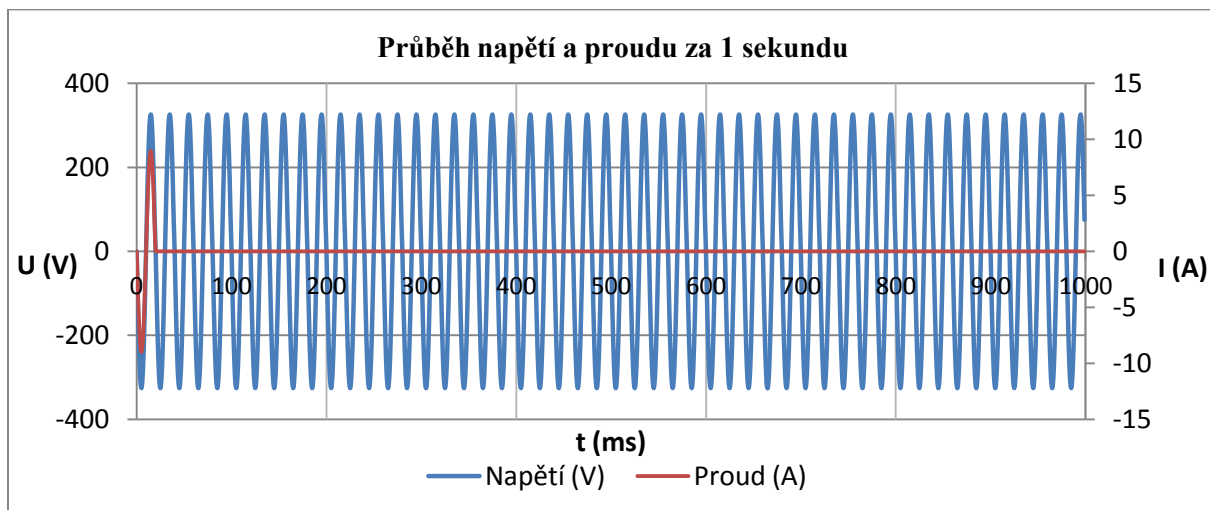
Tento simulovaný průběh převedeme do diskrétní oblasti, přesně, tak jak to dělá měřicí karta. Vzorkovací kmitočet je stanoven na 1000 Hz. Což nám udává 20 vzorků na periodu. Postupně budeme počítat efektivní hodnoty napětí a proudu po časových úsecích 1, 5, 10, 25 a 50 period. Z efektivních hodnot napětí a proudu z těchto úseku se vypočte spotřebovaná el. energie za úsek a celková spotřebovaná energie se bude rovnat součtu el. energií z těchto úseků. Jako referenční hodnota nám bude sloužit suma el. energie vypočítaná přímo z okamžitých hodnot vzorků napětí a proudu.

Výsledky jsou zobrazeny v tab. 6.1, jak je vidět ve všech případech je celková el. energie stejná, takže chyba měření při nepřerušovaném průběhu napětí a proudu je v tomto případě nulová.

Tab. 6.1 Výsledky el. energie při průběhu č. 1

	el. energie (Wh)	chyba vůči referenční hodnotě (%)
<b>referenční hodnota</b>	<b>1447,092</b>	
vypočítané úseky po 1 periodě	1447,092	0,000
vypočítané úseky po 5 periodách	1447,092	0,000
vypočítané úseky po 10 periodách	1447,092	0,000
vypočítané úseky po 25 periodách	1447,092	0,000
vypočítané úseky po 50 periodách	1447,092	0,000

Nyní přejdeme k průběhu č. 2, při kterém budeme simulovat sepnutí proudu na časový úsek 20 ms během jedné sekundy viz. obr. 6.5. Hodnoty napětí a proudu budou o stejných hodnotách jako v průběhu č. 1, pokles napětí způsobený průchodem proudu v tomto případě zanedbáme. Tento jedno sekundový průběh se bude opakovat celou hodinu. Postup pro výpočet celkové el. energie bude stejný jako v průběhu č. 1.



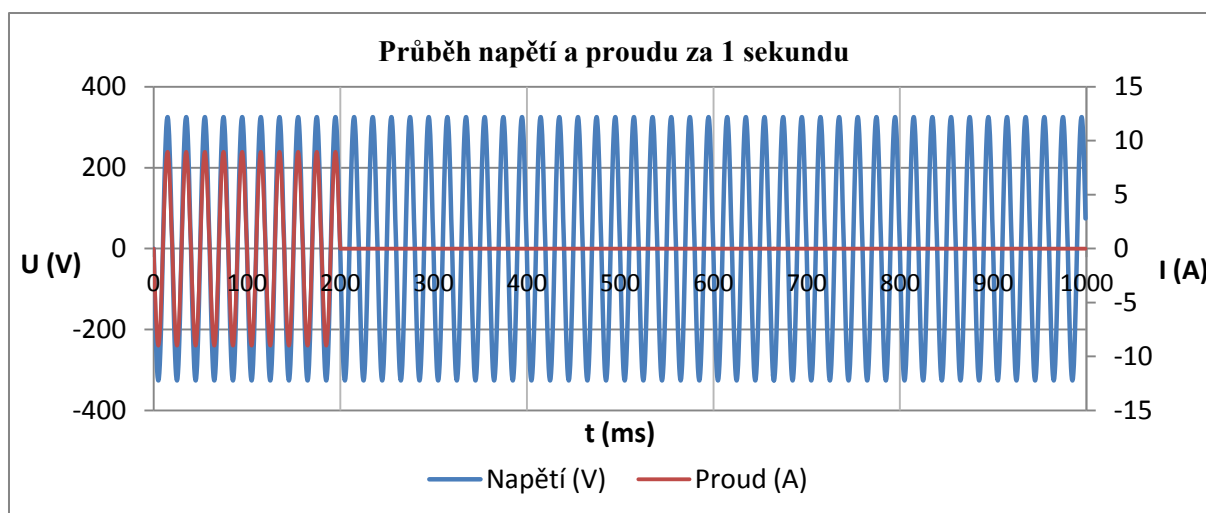
Obr. 6.5 Průběh napětí a proudu č. 2

Z tab. 6.2 vidíme, že v případě průběhu č. 2, již hodnoty vypočtené el. energie nejsou v některých případech stejné a chyba měření narůstá s délkou úseku pro výpočet.

Tab. 6.2 Výsledky el. energie při průběhu č. 2

	el. energie (Wh)	chyba vůči referenční hodnotě (%)
<b>referenční hodnota</b>	<b>28,942</b>	
vypočítané úseky po 1 periodě	28,942	0,000
vypočítané úseky po 5 periodách	64,716	123,607
vypočítané úseky po 10 periodách	91,522	216,228
vypočítané úseky po 25 periodách	144,709	400,000
vypočítané úseky po 50 periodách	204,650	607,107

Abychom mohli stanovit patřičný závěr vytvoříme ještě poslední průběh, průběh č. 3 viz. obr. 6.6, který bude simulovat průchod proudu v časovém úseku 200 ms což odpovídá 10 periodám proudu, takovýto průběh se již blíží reálnému průběhu proudu při chodu pece v pulzním režimu. Podmínky budou stejné jako u předchozích měření.



Obr. 6.6 Průběh napětí a proudu č. 3

Jak je vidět z tab. 6.3 výsledky celkové spotřeby el. energie za jednu hodinu provozu při průběhu č. 3 jsou rozdílné již pouze ve dvou případech.

Tab. 6.3 Výsledky el. energie při průběhu č. 3

	el. energie (Wh)	chyba vůči referenční hodnotě (%)
<b>referenční hodnota</b>	<b>289,418</b>	
vypočítané úseky po 1 periodě	289,418	0,000
vypočítané úseky po 5 periodách	289,418	0,000
vypočítané úseky po 10 periodách	289,418	0,000
vypočítané úseky po 25 periodách	457,611	58,114
vypočítané úseky po 50 periodách	647,159	123,607

Když pozorně porovnáme výsledky ze všech tří simulovaných průběhu, tak zjistíme, že chyba měření je způsobena špatnou volbou velikosti časového okna pro výpočet efektivní hodnoty proudu. Pokud je v časovém oknu úsek, ve kterém dojde k přerušení proudu nebo je zde úsek, kdy hodnoty proudu se blíží k nule, tak při výpočtu el. energie z efektivních hodnot proudu z tohoto časového okna vzniká chyba, která se zvětšuje přímo úměrně se zvětšujícím se úsekem, kdy je proud nulový nebo blíží se nulovým hodnotám. Chyba se prakticky neprojeví pokud je výskyt výše uvedených časových oken pouze několik. Chyba začíná být viditelná až pokud je takových časových oken během jedné hodiny několik desítek, což v režimu pulzní regulace je i několik tisíc.

Abychom zabránili vnesení této chyby, musí časové okno obsahovat buď plný průběh proudu nebo nulový průběh proudu, popřípadě průběh proudu v hodnotách blížících se nule.

Pulzní regulace spíná a vypíná proud při průchodu nulou, což nám určuje nejmenší možný



časový průběh proudu a to je jedná perioda. Abychom dosáhli požadované přesnosti měření, je potřeba provádět výpočet spotřebované el. energie z maximálního časového okna jedné periody v ideálním případě je ještě vhodnější počítat el. energii přímo z okamžitých hodnot napětí a proudu podle vzorce (6.2). Použití tohoto vzorce nám zaručuje naprostou přesnost měření el. energie.

$$E = \int_0^T p(t) \cdot dt = \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (6.2)$$

Jelikož měřicí karta převádí analogový signál na digitální, tak se musíme přesunout do diskrétní oblasti a vzorec upravit podle toho, jak je nastavena vzorkovací frekvence měřicí karty. V tomto případě převádí měřicí karta napětí a proud o frekvenci 50 Hz. Vzorkovací frekvence karty je nastavena na 1000 Hz na každý kanál, což znamená, že karta sejme 1000 vzorků napětí a proudu za sekundu, což nám určuje periodu vzorkování  $\Delta t$  na 1ms. To znamená, že vypočtena el. energie n-tého úseku se bude rovnat el. energii spotřebované za 1 ms, celková spotřebovaná el. energie bude v tomto případě suma el. energií těchto úseků. Nyní upravíme vzorec (6.2), kde  $n$  je celkový počet vzorků za daný časový úsek:

$$E = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \Delta t = \sum_{i=1}^n u_i \cdot i_i \cdot \Delta t = \sum_{i=1}^n u_i \cdot i_i \cdot 3,6 \cdot 10^6 \quad (6.3)$$

Takto upravený vzorec vložíme do programu "PEC" a můžeme přejít na měření č. 2.

## 6.2. Měření č. 2

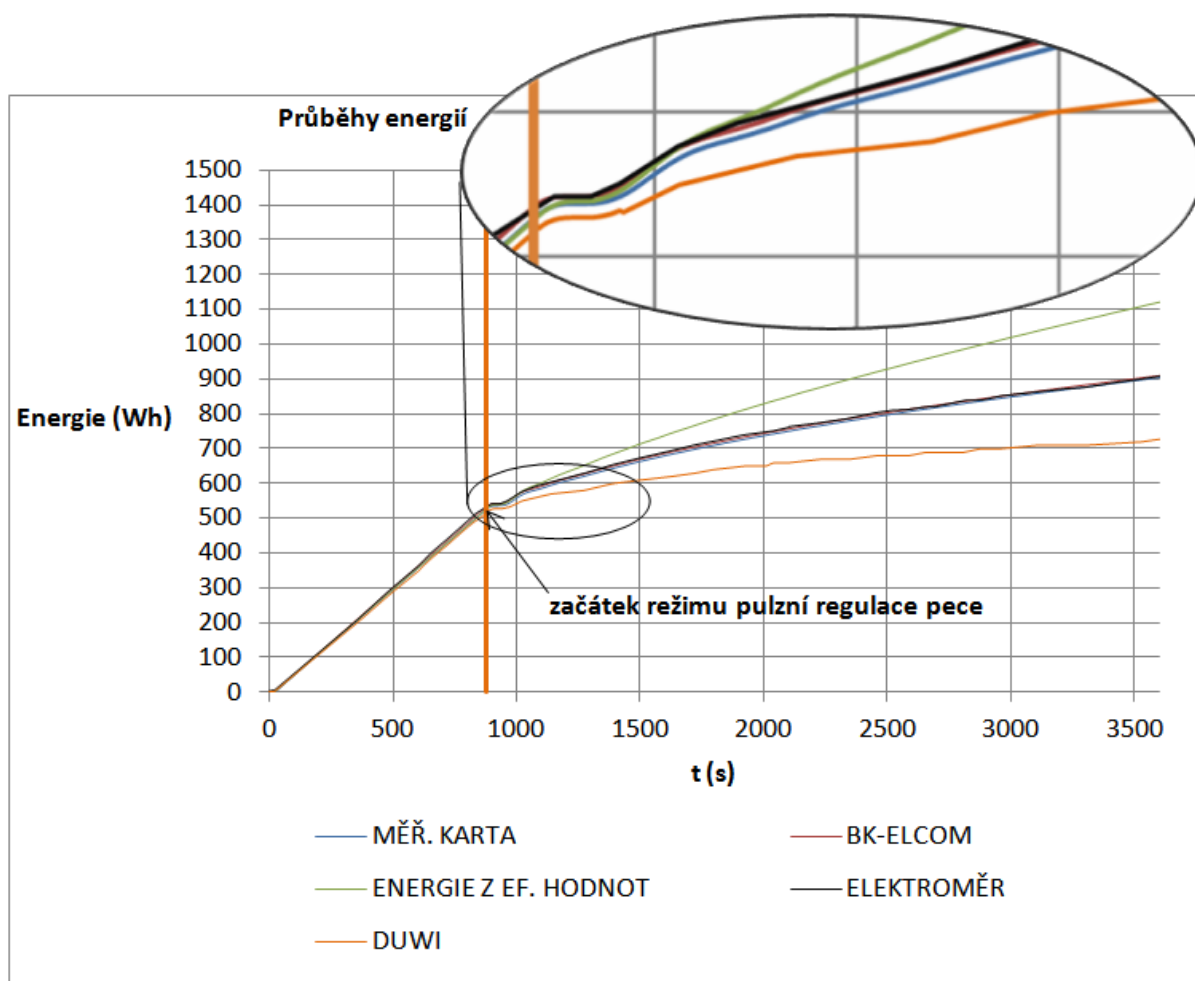
Pro ověření správnosti výpočtu jsem opět použil referenční přístroj BK-ELCOM a pro větší názornost jsem do měřicího obvodu zapojil ještě elektroměr a měřič el. energie DÜWI model 27163.



Dále jsem nechal v programu pro porovnání výpočet el. energie z efektivních hodnot napětí a proudu vypočítávaných po jednosekundových úsecích.

Měření č. 2 probíhalo stejně jako měření č. 1, průběh měření je patrný z obr. 6.8. Dokud pec byla zapnuta bez pulzní regulace, tak absolutní chyba měření byla minimální. Po přepnutí pece do režimu pulzní regulace, začala odchylka měření systematicky vzrůstat u měřiče el. energie DÜWI a u el. energie počítané z efektivních hodnot za jednu sekundu. Hodnoty el. energie počítané z okamžitých hodnot podle vzorce (6.3) byly v tomto případě již stejné jako hodnoty naměřené referenčním měřidlem BK-ELCOM a elektroměrem.

Obr. 6.7 Měřič el. energie DÜWI model 27163



Obr. 6.8 Porovnání průběhu spotřebované energie pece měřeno čtyřmi různými měřicími přístroji

Tato názorná ukázka nám blíže přiblížila problematiku měření el. energie při režimu pulzní regulace, kdy je potřeba vhodně zvážit výběr přístroje pro měření el. energie. Ideální je zvolit měřicí přístroj s vestavěným A/D převodníkem, který provádí výpočty z jednotlivých vzorků. Nevýhodou je ovšem vyšší pořizovací cena tohoto přístroje.

## 7. Možnosti využití vytvořeného programu

Využití programu "PEC" v praxi je hned několik. Hlavní využití je při výuce předmětů zabývajících se elektrotepelnou technikou, kdy lze názorně ukázat poměr mezi spotřebou el. energie a ohřevem vsázky za daný čas. Další využití je ve výuce u předmětů zabývajících se využitím počítačů v elektroenergetice, kdy poslouží jako názorná ukázka použití měřicí karty v praxi. Jelikož program "PEC" umožňuje uložit naměřené vzorky napětí a proudu, tak díky této možnosti můžeme pracovat s odebranými vzorky v programu Excel a provádět se vzorky různé matematické výpočty a zobrazovat je v grafu.

### 7.1. Praktická ukázka využití vytvořeného programu

Pro praktickou ukázkou využití programu "PEC" jsem si vybral měření spotřeby el. energie při ohřevu vsázky z různých materiálů. Jednalo se o materiály dural, mosaz, měď a železo. Jedna sada vzorků měla velikost 35 x 35 x 70 mm, druhá sada měla velikost 35 x 70 x 70 mm, celkem tedy osm vzorků. Tyto vzorky již byly v minulosti ohřáté, takže některé jsou pokryty zoxidovanou vrstvou, nejvíce z nich měděný vzorek. Viz. obr. 7.1 a 7.2.



Obr. 7.1 První sada vzorků z prava do leva, vzorek č. 1 (dural), č. 2 (mosaz), č. 3 (měď), č. 4 (železo)



Obr. 7.2 Druhá sada vzorků z prava do leva, vzorek č. 5 (dural), č. 6 (mosaz), č. 7 (měď), č. 8 (železo)

Referenční hodnotu spotřebované el. energie pro ohřev jednotlivých vzorků z teploty 27 °C na teplotu 450 °C jsem vypočetl podle vzorce

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (7.1)$$

kde  $Q$  [J] je teplo potřebné pro ohřátí na požadovanou teplotu,  
 $m$  [kg] je hmotnost,  
 $c$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je tepelná kapacita daného materiálu,  
 $\Delta T$  [K] je teplotní rozdíl.

Platí, že  $3600 \text{ J} = 1 \text{ Wh}$ , takže vypočítané teplo převedeme na el. energii

$$E = \frac{Q}{3600} [\text{Wh}] \quad (7.2)$$

Nyní přejdeme k samotnému měření. Teplota vzorků byla snímána za pomoci termočlánku a vše zaznamenával a vypočítával program "PEC". Jednotlivé vzorky byly ohřívány z teploty 27 °C až na teplotu 450 °C, po dosažení této teploty bylo měření automaticky ukončeno a uloženo do souboru programem "PEC". V *tab. 7.1 a 7.2* jsou uvedeny vypočtené hodnoty a výsledky z měření první a druhé sady vzorků, od kterých je již odečtena el. energie potřebná ke krytí tepelných ztrát pece. Za hodinu provozu spotřebuje pec na krytí tepelných ztrát el. energii o velikosti 249 Wh.

Tab. 7.1 Výsledky měření spotřeby el. energie u první sady vzorků

	$c$ [ $\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}$ ]	$m$ [kg]	čas ohřevu [s]	el. energie vypočtená [Wh]	el. energie změřená [Wh]	chyba [Wh]
<b>dural</b>	913	0,235	1498	25,210	27,193	-1,983
<b>mosaz</b>	385	0,700	1369	31,666	32,917	-1,251
<b>měď</b>	394	0,750	1775	34,721	37,630	-2,909
<b>železo</b>	450	0,650	1542	34,369	34,441	-0,072

Tab. 7.2 Výsledky měření spotřeby el. energie u druhé sady vzorků

	$c$ [ $\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}$ ]	$m$ [kg]	čas ohřevu [s]	el. energie vypočtená [Wh]	el. energie změřená [Wh]	chyba [Wh]
<b>dural</b>	913	0,47	2366	50,420	55,558	-5,137
<b>mosaz</b>	385	1,4	2570	63,333	67,407	-4,075
<b>měď</b>	394	1,5	2372	69,443	68,122	1,321
<b>železo</b>	450	1,3	2259	68,738	84,833	-16,096

Jak je vidět z výsledků měření, tak ne vždy jsou vypočtené a změřené hodnoty shodné, to je dáno především tím, že tepelná kapacita je udávána pro teplotu 20 °C a se zvyšující teplotou se mění. Dále je zde několik faktorů, které ovlivňují výsledky měření, jedná se především o tepelný odpor stykové plochy termočlánku a vzorku, který závisí na přitlačné síle a ne vždy lze dosáhnout stejných hodnot. Další problém je, že při ohřívání se na některých materiálech vytvoří zoxidovaná vrstva, která má jiné chemické vlastnosti než samotný materiál, čímž má rozdílnou tepelnou vodivost než samotný materiál a prostup tepla do vsázky, délka ohřevu a spotřeba el. energie se mění. Dále při vkládání vzorku do pece musíme otevřít dveře, což má za následek, že dojde k poklesu teploty pece, to se projeví na

spotřebě el. energie, což nám způsobí další chybu. Poslední chyba, která se vnáší do měření, je chyba měřicího transformátoru napětí a chyba klešťového ampérmetru.

Dosáhnout teoretických hodnot při měření v elektrotepelné technice je velmi obtížné a komplikované, což je vidět na množství výše uvedených faktorů, které vnáší chyby do měření a ovlivňují konečný výsledek.

## 8. Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit software pro monitorování chodu elektrické odporové pece. Při tvorbě tohoto programu jsem však narazil na několik problémů. Při řešení těchto problémů jsem získal mnoho cenných zkušeností. Jedním z nich byly chybné hodnoty spotřebované el. energie el. pece, které vypočítával program "PEC". Díky možnosti tohoto programu ukládat vzorky napětí a proudu, jsem mohl tyto vzorky analyzovat a provádět s nimi výpočty v programu EXCEL a zjistit příčinu chybného měření el. energie při pulzní regulaci, kdy chyba byla způsobena špatně zvoleným časovým oknem pro výpočet efektivních hodnot a následně vypočtená celková el. energie z těchto hodnot nebyla správná. Chtěl jsem v této práci upozornit na problém měření el. energie při pulzní regulaci, protože v dnešní době se objevuje čím dál více zařízení, která využívají pulzní regulaci. Pokud chceme měřit spotřebu el. energie, tak ne všechny měřiče el. energie umějí měřit správně tyto průběhy a výsledkem jsou potom nepřesné hodnoty, které mohou být matoucí.

Program "PEC" nám předvedl základní možnosti využití měřicího řetězce "PC - měřicí karta - vývojové prostředí". Využití těchto prvků je ovšem daleko větší, můžeme sestavit měřicí zařízení, které nám umožňuje měřit jakékoliv veličiny. Měřicí karta PCA-7228AS použitá v této práci, může měřit mimo jiné až osm různých veličin, které lze převést pomocí převodníků na napětí. Vysokou přesnost měření nám zaručuje maximální vzorkovací frekvence měřicí karty, která je 100 kHz. Ve spojení s vývojovým prostředím, díky kterému můžeme naprogramovat jakékoliv výpočtové operace můžeme vytvořit měřicí řetězec, který může být použit k měření veličin, které měří Analyzátor sítí BK-ELCOM, přičemž hlavní a podstatnou výhodou tohoto měřicího řetězce je cena pořízení, která je nesrovnatelně nižší než pořizovací cena např. Analyzátoru sítí BK-ELCOM.

## Použitá literatura

- [1] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: ČVUT Praha, 2011. ISBN 978-80-01-043938-9.
- [2] NOVÁK, Pavel. FAKULTY ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY TECHNICKEJ UNIVERZITY V KOŠICIACH. *Elektrické ohrevy: I. časť Odporový ohrev, teoretické princípy a základy modelovania teplotných polí*. Košice, 2002.
- [3] NOVÁK, Pavel. TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH. *ZÁKLADY ELEKTROTEPELNEJ TECHNIKY*. Košice, 2002.
- [4] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, ISBN 80-730-0145-4.
- [4] *Microsoft Visual Basic 6.0: příručka programátora*. 1. vyd. Praha: Computer Press, 1999, 820 s. ISBN 80-722-6154-1.
- [5] HALVORSON, Michael. *Visual Basic 6.0 Professional: krok za krokem : naučte se Visual Basic vlastním tempem na reálných příkladech (obsaženy na doprovodném CD)*. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 1999, xxxii, ISBN 80-722-6169-X.
- [6] DŘÍNEK, Milan. Peltierovy termobaterie. In: KOSEK, Jiří. *Http://www.hw.cz/: tvorba dokonalých WWW stránek : podrobný průvodce* [online]. Vyd. 1. Praha: Grada, 1998 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART652-Peltierovytermobaterie.htm>

## **Příloha A**

Příloha A se nachází na přiloženém CD a obsahuje soubory se zdrojovým kódem programu "PEC" , které lze spustit ve vývojovém prostředí Visual Basic 6.0.

Seznam souborů na CD:

- frmPec.frm
- Pec.vbp
- Pec.vbw
- modMain.bas
- tedia\_daq01\_c.bas
- tedia\_daq01h.bas